



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Disseny d'un sistema d'alerta de corrents d'arrossegalls
basat en lògica difusa**

Autor/a

Clara Unzeta Lloret

Tutor/a

Marc Berenguer Ferrer i Daniel Sempere Torres

Departament

Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia (CRAHI)

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i geofísica

Intensificació

Data

MAIG 2012

RESUM

Títol: Disseny d'un sistema d'alerta de corrents d'arrossegalls basat en lògica difusa

Autora: Clara Unzeta Lloret

Tutors: Marc Berenguer Ferrer i Daniel Sempere Torres

Paraules clau: corrent d'arrossegalls, amenaça, lògica difusa, pluja radar, sistema d'alerta, susceptibilitat, corbes llinar

Un corrent d'arrossegalls (*debris flow*) és un moviment de massa compost d'aigua i una gran proporció de sediment que es propaga pendent avall per l'acció gravitatòria. La causa d'inicialització més habitual és la pluja, que en incrementar la pressió de porus, provoca la inestabilitat del terreny augmenti. Es tracta d'un fenomen altament destructiu que zones de muntanya provoca enormes pèrdues econòmiques i humanes. A banda de les eventuais mesures de protecció estructurals, per tal de minimitzar els danys que causen els corrents d'arrossegalls és imprescindible desenvolupar sistemes de previsió i alerta. Davant de la complexitat del fenomen, s'ha intentat abordar la problemàtica de l'avaluació de l'amenaça des de molts punts de vista: des de models numèrics de simulació a tècniques estadístiques. En un sistema d'alerta a escala regional, però, les limitacions per obtenir dades i cost computacional obliga a trobar un compromís entre la simplicitat del sistema i la representativitat del fenomen.

En aquesta tesina s'han combinat dues línies de treball per dissenyar un sistema d'alerta d'amenaça de corrents d'arrossegalls. Per una banda, les corbes llinar són una eina àmpliament utilitzada en la previsió d'ocurrència d'esllavissades i corrents d'arrossegalls. Aquestes estableixen relacions entre la magnitud dels factors desencadenants (pluja) i l'ocurrència de corrents d'arrossegalls. Per l'altra banda, per tal de determinar factors condicionants, s'estan dedicant esforços a descobrir patrons de comportament a partir de característiques geomorfològiques de les conques. Aquestes variables tenen l'avantatge de que es poden calcular de manera relativament senzilla a partir d'informació de l'orografia (mapes digitals d'elevacions) que és una informació disponible en la majoria de les situacions.

El sistema d'alerta dissenyat integra de manera innovadora les dades de pluja radar per a l'avaluació de l'amenaça de corrents d'arrossegalls, proporcionant un nivell d'amenaça a cada conca de la zona d'estudi i en cada pas de temps. El radar és una eina de mesura indirecta de la precipitació que té l'avantatge de proporcionar un camp distribuït a molt alta resolució. Els criteris per assignar el nivell d'amenaça es basen en la combinació de dos aspectes: la susceptibilitat i la magnitud de l'episodi de pluja a cada conca. La primera és avaluada a partir de les seves característiques geomorfològiques i la segona a partir de les dades de pluja radar i corbes intensitat-durada-pluja antecedent. Per avaluar aquests aspectes i combinar-los s'utilitza lògica difusa. La lògica difusa permet combinar diverses variables d'una forma molt flexible amb un cost computacional molt baix. Tot i que no es tracta d'un model físic, aquesta flexibilitat permet copsar la física que hi ha darrera el fenomen i introduir els coneixements experts del modelador.

L'última part de la tesina ha consistit en aplicar el classificador al període de maig a octubre en la zona d'estudi situada als Pirineus Orientals. S'han analitzat les tendències de comportament general en tot el període i en cinc episodis curts. En alguns pocs casos en què es disposava d'informació sobre l'ocurrència de corrents d'arrossegalls en conques concretes, s'ha avaluat el funcionament del classificador comparant aquesta informació amb les alertes que proporcionava el classificador. Concretament s'han estudiat casos a les conques del Rebaixader i del Torrent d'Erill (Alta Ribagorça) i Port Ainé (Pallars Sobirà).

ABSTRACT

Title: Debris flow warning system using a fuzzy logic approach

Author: Clara Unzeta Lloret

Advisors: Marc Berenguer Ferrer i Daniel Sempere Torres

Keywords: debris flow, hazard, fuzzy logic, radar data, warning system, susceptibility, threshold curves

A debris flow is a mass composed by water and sediment in movement due to the gravity action. The most common triggering factor is rainfall, which leads to slope failure by increasing the soil pores pressure. Debris flows are highly destructive and provoke enormous economical and human losses. In order to minimize the damage, it is imperative to complement the structural measures with forecast and warning systems.

Several approaches have been developed to face the problem: from numerical simulation models to statistic techniques. However, in the case of a regional-scope warning system, there are some limitations regarding data availability and computational requirements. Therefore, a compromise between simplicity of the model and reality must be found. In this work, two different approaches have been combined to design a debris flow warning system. On one side, rainfall thresholds are widely used in landslide and debris flow prevention. Thresholds build a relationship between triggering factors (characteristics of the rainfall event) and debris flow occurrence. On the other side, establishing the conditioning factors is helpful for recognizing behaviour patterns. Geomorphological factors are conditioning parameters that can be easily derived from topographic information (digital elevation models), which are available in most situations.

The warning system developed in this work integrates rainfall data from radar in an innovative way. Radar data are indirect measurements that provide a distributed rainfall field with a high resolution. This allows the system to supply a hazard level in each catchment of the study area at every time step. The criteria used to assign a hazard level are two: the susceptibility of the catchment and the magnitude of the rainfall event. The former is determined by the geomorphologic characteristics and the later depends on the rainfall event (radar data) and threshold curves. These two aspects are evaluated and combined using fuzzy logic. Fuzzy logic theory enables combining different parameters in a very flexible way with very low computational requirements. This flexibility allows reflecting the physical meaning of the phenomenon by introducing expert knowledge.

The last part of this work consists in the implementation of the system in the study area situated (subdomain in the eastern Pyrenees) during the period from May until October 2010. The results have been analysed both looking for general trends and specifically during five short rainfall events. In a few cases where information about debris flow occurrence was available, this was used to evaluate the correct performance of the system. In particular the following catchments have been studied: Rebaixader and Torrent d'Erill (Alta Ribagorça region) and Port Ainé (Pallars Sobirà region).

AGRAÏMENTS

En primer lloc m'agradaria agrair al Marc Berenguer tota la dedicació i l'entusiasme al llarg d'aquests vuit mesos al CRAHI.

Al Daniel Sempere vull agrair-li haver-me donat la possibilitat de fer la tesina al CRAHI.

Al Grup d'Investigació en Transport de Sediments (GITS) per haver-nos proporcionat les dades de partida d'aquest treball. En particular, al Guillaume Chevalier per les seves explicacions i perquè sense la seva col·laboració aquest treball no hagués estat possible, així com al Vicente Medina i al Francesco Bregoli per la discussió. I al Marcel Hürlimann i a la Clàudia Abancó per la informació sobre l'ocurrència de corrents d'arrossegalls durant el període estudiat i els seus valuosos comentaris.

Gràcies també a la resta de companys del CRAHI, especialment al Jordi i al Felipe, per estar sempre disposats a donar un cop de mà, i haver sabut arrancar-me un somriure en moments d'ofuscació.

A la meva família, l'Ana, l'Eduard i la Mar, per ser incondicionals.

Finalment, m'agradaria donar les gràcies especialment a la Marta, el Gil, l'Arnau, la Clara, el Marc, la Laura, la Mireia, el Mingu, la Mònica, la Núria i la Maria, per tot el camí que hem recorregut junts durant la carrera i per ensenyar-me'n la millor lliçó.

A tots, gràcies.

Agraïm a l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA) i al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) la cessió de les dades de pluviòmetres i radar utilitzades en aquest treball.

Aquest treball s'ha realitzat en el marc del projecte de la Comissió Europea IMPRINTS (FP7-ENV-2008-226555)) i dels projectes de Recerca Fonamental No Orientada del Ministeri de Ciència i Innovació FFGRad (CGL2009-13139) i ProFEWS (CGL2010-15892). L'autora agraeix a l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) una Beca de Col·laboració (2011-2012) per a la realització d'aquest treball.

ÍNDEX

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ	7
1.1 CONTEXT I JUSTIFICACIÓ	7
1.2 L'ESTUDI DE L'AMENÇA DE CORRENTS D'ARROSSEGALLS AL PIRINEU ORIENTAL	8
1.3 LÍNIES GENERALS DE LA TESINA	9
1.3.1 Antecedents	9
1.3.2 Objectius	10
CAPÍTOL 2. CORRENTS D'ARROSSEGALLS (DEBRIS FLOWS)	11
2.1 CARACTERITZACIÓ DELS CORRENTS D'ARROSSEGALLS	11
2.1.1 Mecanismes de formació i transformació	13
2.1.2 Factors condicionants i desencadenants	13
2.2 AVALUACIÓ DE L'AMENÇA	14
2.2.1 Sistemes d'alerta i susceptibilitat	14
2.2.2 Metodologies d'avaluació d'amenaça	16
2.2.3 Corbes lllindar	16
CAPÍTOL 3. MARC D'ESTUDI	19
3.1 ÀREA D'ESTUDI	19
3.2 DADES DE PLUJA	21
3.2.1 El camp de pluja radar	22
3.2.2 Episodis	24
CAPÍTOL 4. ASPECTES PREVIS:PROJECTE IMPRINTS I DESCRIPCIÓ DE LES DADES.....	29
4.1 MODEL FÍSIC	30
4.2 ELABORACIÓ DE CORBES ID	30
4.3 CARACTERÍSTIQUES GEOMORFOLÒGIQUES I SUSCEPTIBILITAT	32
4.4 DISSENY DEL SISTEMA D'ALERTA.....	34
CAPÍTOL 5. LÒGICA DIFUSA.....	35
5.1 INTRODUCCIÓ A LA LÒGICA DIFUSA. MOTIVACIÓ	35
5.2 FUNCIONS DE PERTINENÇA.....	36
5.3 OPERADORS	37
5.4 APLICACIÓ DE LA LÒGICA DIFUSA AL CLASSIFICADOR.....	38
CAPÍTOL 6. DISSENY DEL CLASSIFICADOR.....	41
6.1 CÀLCUL DE LA SUSCEPTIBILITAT	42
6.1.1 Anàlisi de les variables estàtiques.....	43
6.1.2 Ajust de les funcions de pertinença de les variables estàtiques.....	48
6.2 MAGNITUD DE L'EPISODI DE PLUJA	56
6.2.1 Càlcul de les variables dinàmiques: % area inestable	57
6.2.2 Funció de pertinença de les variables dinàmiques.....	58

6.3	CLASSIFICACIÓ: REGLES, OPERADORS, NIVELL ALERTA.....	59
6.3.1	<i>Operadors</i>	60
6.3.2	<i>Regles</i>	64
6.4	DISCUSSIÓ D'ALGUNS ELEMENTS DEL CLASSIFICADOR	70
CAPÍTOL 7. APLICACIÓ AL PERÍODE DE MAIG A OCTUBRE DE 2010		73
7.1	INTRODUCCIÓ	73
7.2	PERÍODE DE MAIG A OCTUBRE DE 2010	73
7.3	EPISODIS SELECCIONATS	81
7.4	DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.....	96
CAPÍTOL 8. CONCLUSIONS I DISCUSSIÓ		97
8.1	RESUM DE LA TESINA	97
8.2	LIMITACIONS I POTENCIAL DE LA METODOLOGIA	98
8.3	EXTENSIÓ A ALTRES CONQUES O REGIONS	101
8.4	LÍNIES A FUTUR	102
REFERÈNCIES		103

CAPÍTOL 1

INTRODUCCIÓ

1.1 Context i justificació

Un corrent d'arrossegalls (en anglès *debris flow*) és un flux format per una barreja densa d'aigua i sediments que es propaga pendent avall per l'acció gravitatòria. Aquest pot adquirir grans dimensions i altes velocitats de manera que pot arribar a ser extraordinàriament destructiu. A més, moltes vegades ocorre sense avís previ i la seva predicció per tal de generar sistemes d'alerta és difícil.

Els danys ocasionats pels corrents d'arrossegalls sumen cada any un gran nombre de morts i greus pèrdues econòmiques arreu del món. A la Península Ibèrica es tracta d'un fenomen relativament poc freqüent si es compara amb altres països com Itàlia o el Japó, on en els últims temps han perdut la vida una mitjana de gairebé 50 persones cada any (Takahashi, 2007). Tot i així, l'amenaça existeix tal com es va poder comprovar en el desastre de l'estiu de 1996 a Biescas, al Pirineu central, on 87 persones van perdre la vida (Hürlimann et al., 2006) o durant l'episodi del 6 i 7 de novembre de 1982, quan la intensa pluja va desencadenar nombrosos corrents d'arrossegalls en tots els Pirineus (Corominas et al., 1998).

Accions antropogèniques com la desforestació i construcció de carreteres poden augmentar la susceptibilitat en algunes zones. Per altra banda, la pressió urbanística i les limitacions d'espai en zones muntanyoses han fet que en els darrers anys s'hagin anat colonitzant zones típicament afectades per fenòmens d'aquest tipus com ara planes d'inundació o cons de dejecció.

Com davant de qualsevol desastre natural, pot fer-s'hi front amb diferents estratègies. Les anomenades mesures *dures* són mesures pal·liatives que tracten d'evitar els efectes mitjançant obres de contenció com ara dics o estructures de protecció en carreteres. En contraposició, les mesures *toves* es centren en la predicció per tal de prendre les mesures necessàries amb antelació, com ara una correcta planificació urbana o l'evacuació de persones en un cas extrem.

La gestió del risc resulta molt més eficaç i té un menor impacte ambiental si es concep de manera integral, complementant les mesures estructurals amb la previsió i la prevenció. Arreu del món, però especialment en països empobrits on en general la població és més vulnerable a les catàstrofes naturals, una adequada planificació territorial i urbanística que respecti els llocs més exposats a aquests riscos pot evitar molts danys.

Degut a la importància de disposar de sistemes d'alerta eficaços, des de fa anys s'estan dedicant molts esforços en l'elaboració i millora de metodologies a tots els nivells: des de la presa i tractament de dades de pluja a la creació de mapes de risc. Aquesta tesina s'enfoca al disseny d'un classificador que permeti avaluar l'amenaça per tal de crear mapes d'alerta en temps real.

1.2 L'estudi de l'amenaça de corrents d'arrossegalls al Pirineu oriental

Els corrents d'arrossegalls són un fenomen molt complex, i tot i els esforços fets per comprendre i modelitzar el seu comportament, encara resten molts interrogants, de manera que la seva ocurrència resulta encara "imprevisible".

Davant de la complexitat del fenomen, s'ha intentat abordar la problemàtica de l'avaluació de l'amenaça des de molts punts de vista. En totes les metodologies, però, es fa palesa la dificultat per representar d'una manera adequada la realitat, ja que la quantitat de factors que hi intervenen obliguen sempre a simplificar. Els intents per establir regles universals, doncs, corren el risc de resultar poc representatius a causa d'un excés de simplificació. El repte consisteix en aquest cas en trobar un compromís entre la simplicitat de la metodologia i el manteniment d'una correspondència amb la realitat.

Si a més es pensa en un sistema d'alerta d'abast regional, aquest no es pot basar en models de simulació que triguen hores en executar-se i necessiten dades a gran resolució sinó que s'han de trobar variables que siguin relativament fàcils d'obtenir per a qualsevol zona i que ajudin, potser de manera més indirecta, a establir patrons de comportament.

Una de les tècniques més esteses són les corbes llindar. Són corbes que relacionen factors desencadenants (habitualment intensitat i durada de la pluja) amb l'ocurrència del fenomen. Per exemple, algun estudi a la zona dels Pirineus Orientals conclou que són les pluges curtes i d'alta intensitat les que acostumen a desencadenar corrents d'arrossegalls (Portilla et al., 2010). Per la seva banda, Corominas i Moya (1999) distingeix dos patrons per la zona alta del Llobregat: a) episodis sense pluja antecedent, alta intensitat i curta durada causen la majoria de corrents d'arrossegalls i esllavissades en dipòsits col·luvials o roques meteoritzades, b) episodis amb pluja antecedent, intensitat moderada de com a mínim 40 mm en 24h reactiven la mobilitat en formacions argiloses.

No obstant, l'ocurrència no depèn només dels factors desencadenants, sinó que hi ha tot una sèrie de factors locals que fan que hi hagi més o menys predisposició. Per exemple, l'orografia condiona la concentració del flux, i la capacitat d'infiltració està influenciada per factors com ara la disponibilitat de material, la transmissivitat del sòl, l'orografia, la vegetació i el contingut previ d'aigua. Per aquest motiu, una altra línia d'investigació posa èmfasi en trobar paràmetres locals que ajudin a determinar tendències en el comportament (Chevalier, [-]). Les variables geomorfològiques, per exemple, tenen l'avantatge de que es poden calcular relativament fàcilment a partir de la informació d'orografia (models digitals del terreny), que és una informació disponible en la majoria de les situacions.

A Catalunya no existeix cap sistema d'alerta operacional per fenòmens d'aquest tipus. A nivell de publicacions, existeixen diversos estudis que tracten el tema des de diferents enfocaments. Per mencionar-ne alguns: Corominas i Moya (1999) fan una anàlisi de les condicions de precipitació que desencadenen corrents d'arrossegalls; Corominas et al. (2002) proposen una expressió concreta de l'indici de pluja per esllavissades als Pirineus Orientals, tot posant èmfasi a la necessitat de distingir entre tipus de fenòmens d'inestabilitat a l'hora d'establir l'indici; Hürlimann et al. (2006) fan una anàlisi enfocada al planejament urbà de l'amenaça de corrents d'arrossegalls executant un model de propagació en cinc torrents del Principat d'Andorra; Portilla et al. (2010) analitzen amb detall cinc corrents d'arrossegalls ocorreguts el 2008 incloent múltiples aspectes com la geologia, morfologia, pluja i model de propagació del flux.

En el marc d'aquesta tesina, l'objectiu que es persegueix és fer un pas per desenvolupar una metodologia que contribueixi a acotar aquesta "imprevisibilitat" del fenomen i preveure amb més exactitud l'ocurrència dels corrents d'arrossegalls. El plantejament pel que s'ha optat és el d'unir les dues línies de treball que s'han mencionat anteriorment basades en l'estudi de: (i) les característiques locals que condicionen la susceptibilitat i (ii) les relacions entre els factors desencadenants i l'ocurrència de corrents d'arrossegalls.

En els sistemes de prevenció d'inundacions o avingudes el radar meteorològic és una eina molt utilitzada. En canvi, en el moment de començar aquesta tesina no es coneixen experiències de tècniques de previsió de corrents d'arrossegalls amb dades radar. Malgrat els errors de mesura pels que a vegades poden estar afectats, les camps de pluja radar tenen una alta resolució en el temps i en l'espai, de manera que són una eina amb un gran potencial en el camp de la previsió.

1.3 Línies generals de la tesina

1.3.1 Antecedents

Aquesta tesina s'emmarca dins del projecte del Setè Programa Marc d'Investigació i Desenvolupament Tecnològic de la Comissió Europea IMPRINTS (IMproving Preparedness and Risk maNagemenT for flash floods and debris flow events).

L'objectiu d'IMPRINTS és desenvolupar eines i metodologies que millorin la prevenció i gestió de riscos associats a *flash floods* i *debris flows* per tal de reduir les pèrdues que suposen aquests episodis, tant de vides humanes com econòmiques. A diferència d'altres línies d'actuació que van dirigides més a pal·liar els efectes dels desastres amb construccions d'obra dura com murs de contenció, el projecte IMPRINTS posa l'accent a sistemes de prevenció i d'alerta.

Concretament, el subprojecte 4 d'IMPRINTS té per objectiu desenvolupar un sistema de previsió de *flash flood* i *debris flow* basat en regles. Aquest sistema ha de ser capaç de donar alertes en temps real i ha de considerar la precipitació com a principal factor desencadenant de corrents d'arrossegalls. Aquest factor hidrometeorològic es combina amb algunes característiques locals per donar les alertes.

Aquesta tesina s'ha desenvolupat al CRAHI (Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia) i és el resultat del treball sobre l'última part del subprojecte mencionat. Per tant, tota la feina prèvia desenvolupada pels diversos equips d'investigació que han participat en el subprojecte al llarg de les anteriors tasques ha servit de base i punt de partida (Papa et al., 2010; Bateman et al., 2010; Medina i Zappa, 2011)

1.3.2 Objectius

L'objectiu de la tesina és dissenyar un sistema d'alerta de corrents d'arrossegalls a escala regional que pugui integrar dades de pluja radar a temps real. En un futur es voldria aconseguir un producte útil a nivell operacional i per aquest motiu s'ha treballat per tal que el classificador compleixi una sèrie de requisits: (1) ha d'estar basat en conceptes de lògica difusa, (2) ha de ser de ràpida execució per tal de ser aplicable a temps real, i (3) ha de ser a escala regional.

Per fer-ho, cal determinar quines variables geomorfològiques són més representatives i cal dissenyar un sistema de combinació que integri els diferents tipus de variables.

El cos principal de la tesina s'estructura de la següent manera:

- Per començar es parla dels corrents d'arrossegalls, posant l'accent als factors desencadenants i condicionants així com a l'avaluació de l'amenaça (Capítol 2).
- A continuació es situa el marc d'estudi en dues zones del Pirineu Oriental i es descriuen els episodis de pluja en els que s'ha aplicat el sistema (Capítol 3).
- Tot seguit es fa un resum de la feina prèvia feta en el marc del projecte IMPRINTS en què s'ha basat aquesta tesina (Capítol 4).
- Posteriorment, com que el sistema està basat en lògica difusa, s'introdueixen els conceptes fonamentals de la teoria utilitzats en la tesina (Capítol 5).
- Un cop presentat el marc teòric, es procedeix a descriure el disseny del sistema (Capítol 6).
- En base a la metodologia exposada, s'aplica el sistema al període de maig a octubre de 2010 (Capítol 7).
- Per acabar, es presenten les conclusions generals de la tesina i es proposen algunes línies de treball futur (Capítol 8).

CAPÍTOL 2

CORRENTS D'ARROSSEGALLS (*DEBRIS FLOWS*)

2.1 Caracterització dels corrents d'arrossegalls

Un corrent d'arrossegalls és un tipus de moviment de massa, és a dir un desplaçament de la massa de sòl o roca. El moviment és causat per una inestabilitat del terreny on la pressió intersticial hi juga un paper decisiu : les forces estabilitzadores passen a ser menors que les destabilitzadores. Els principals mecanismes de trencament són: despreniments o caigudes, bolcaments, lliscaments, expansions laterals i fluxos (González de Vallejo et al., 2002).

Els corrents d'arrossegalls es classifiquen com a fluxos, i són moviments en els que les partícules es desplacen a velocitats desiguals de manera que la massa mobilitzada canvia la forma durant el descens i té una aparença desorganitzada.

La caracterització del flux en quant a composició i comportament hidràulic és objecte d'estudi des de fa anys, però encara queden molts aspectes per entendre. Una de les dificultats és l'enorme variabilitat pel que fa a la naturalesa del sediment, les proporcions fase sòlida-fase líquida, els mecanismes d'inicialització, etc., que causen un comportament diferenciat en cada un dels casos. Per exemple, hi ha casos en els que corrents d'arrossegalls poden recórrer grans distàncies en canals amb pendents baixos mentre que en d'altres poden aturar-se en pendents alts. Això manifesta que aspectes com el règim del flux (predominantment laminar o turbulent), la velocitat de propagació, les dimensions que assoleix el corrent, etc., són diferents segons el cas. El calat és més gran a la part frontal, podent arribar a uns quants metres, i disminueix en la zona central del corrent.

Molts autors han proposat classificacions per distingir entre corrents d'arrossegalls i altres fenòmens similars com els anomenats en anglès *debris flood* (Figura 1). Segons la nomenclatura proposada, els *debris flows* agruparien els fluxos que presenten una concentració de sòlids superior al 40% en volum i entre el 60% i el 80% en pes. Altres tipologies de fluxos són les colades de terra, en les que hi predominen els materials cohesius amb elevat contingut de llims i argiles i les allaus de roca, que es desplacen a grans velocitats.

També existeixen classificacions dins de la categoria de corrents d'arrossegalls. Per exemple, segons el contingut de fins es pot distingir entre fluxos viscosos i granulars. Els primers es

caracteritzen per una alta concentració de fins que conforma una matriu viscosa i lubricant, de manera que es comporta com una única fase homogènia i té comportament laminar.

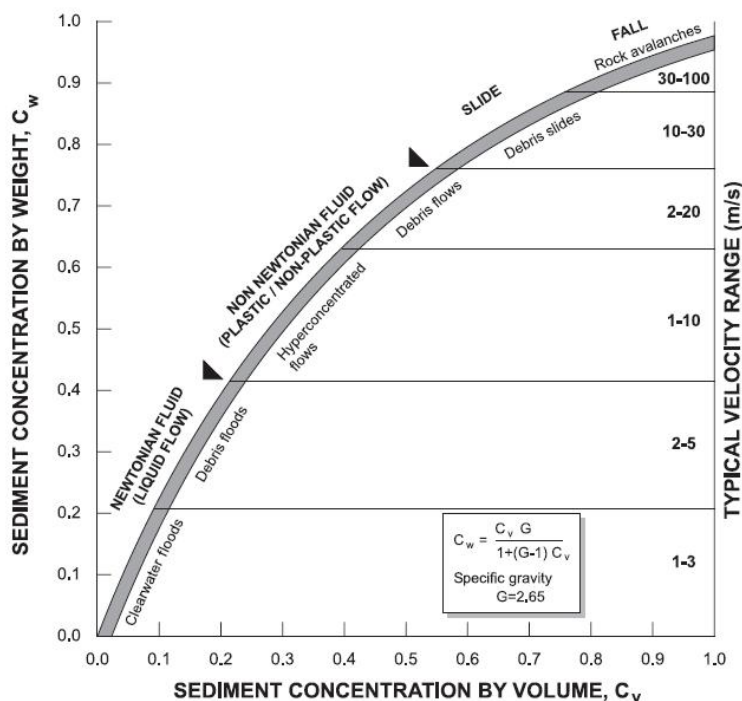


Figura 1. Classificació de la velocitat i comportament de fluxos i esllavissades. Figura modificada de O'Brian (2000) amb dades de Hungr et al (2000) i Pierson i Costa (1987). Extret de Jakob i Jordan (2001).

En aquesta tesina no s'ha aprofundit en aquests aspectes relacionats amb la física del flux ja que l'estudi del comportament mecànic i reològic no és l'objecte d'aquest treball, com tampoc es distingirà a partir d'ara entre tipus de corrents d'arrossegalls.

Els corrents d'arrossegalls es poden descriure en tres fases o zones distingides:

- *Iniciació*: Un volum de sediments comença el moviment, ja sigui amb aportació d'aigua externa o sense. La zona d'inicialització s'anomena àrea font. En aquesta àrea hi abunden els sòls detrítics o existeix una meteorització del substrat.
- *Propagació*. El volum mobilitzat es desplaça al llarg d'un canal establert o pel vessant. L'existència d'un canal marca decisivament el comportament del flux, ja que aquest pot aportar aigua addicional i a més el confinament lateral ajuda a mantenir el calat sense que es dispersi el material. En el seu avanç, el flux produeix erosió mentre creix de mida fins que aparentment arriba a un equilibri en el que s'atura el creixement i l'erosió (Takahashi, 2007).
- *Deposició*. Succeeix quan no hi ha suficient energia per continuar el moviment, ja sigui perquè el terreny es torna pla o perquè desapareix el confinament lateral. El material dipositat és molt heterogeni. Acostuma a estar ben graduat i no estratificat de manera

que es troben barrejats tot el rang de mides de gra, des de blocs d'ordre mètric fins a argiles. Algunes formacions típiques de sediments deixades per *debris flow* són les formes lobulars, en materials cohesius i les *leveés* o parets laterals. En el cas de materials més granulars, els dipòsits tendeixen a escampar-se pel vessant o formar cons de dejecció.

2.1.1 Mecanismes de formació i transformació

Es poden distingir tres tipus de mecanismes d'inicialització (Takahashi, 2007):

- *Incorporació de sediments al corrent d'aigua*: Els dipòsits de sediments de la llera són erosionats a causa d'un aportació d'aigua com per exemple una avinguda torrencial de manera que la concentració de sòlids en el flux esdevé tan densa com en un corrent d'arrossegalls.
- *A partir d'una esllavissada*: Es produeix un col·lapse en una vessant i el material es converteix en un corrent detrític en moviment pels efectes de la líquüefacció del sòl o per aportacions d'aigua de l'exterior. Tan sols amb l'aigua intersticial es pot desenvolupar un corrent d'arrossegalls a partir d'un volum de material mobilitzat sense necessitat d'aportació d'aigua externa, ja que la mateixa aigua intersticial compon la fracció líquida del corrent (Takahashi, 2007).
- *Col·lapse d'una presa natural de terres*: Algunes vegades s'ha observat que després d'una esllavissada que no genera directament un *debris flow* el material es queda obstruint un curs d'aigua i formant així una presa natural. Aquesta situació es pot mantenir un temps, normalment pocs dies fins que la presa cedeix produint un corrent d'arrossegalls.

A vegades s'inclouen altres causes de formació en la classificació com ara l'acció sísmica o l'efecte del desgel. De totes maneres, la causa última en la majoria de casos continua sent la inestabilitat del terreny deguda als efectes directes de la pluja.

2.1.2 Factors condicionants i desencadenants

Com s'ha comentat, la freqüència d'ocurrència de corrents d'arrossegalls i esllavissades depèn molt de la zona geogràfica. Els principals factors dels quals depèn es poden resumir en (González de Vallejo et al., 2002):

- *Factors del relleu*. Tant per la inicialització com per la propagació, són necessàries certes característiques del relleu. Algun exemple és el pendent o la concavitat. En la secció 6.1.1 es discutirà aquest tema amb més profunditat.
- *Estructura geològica i litologia*. Determinen la potencialitat dels moviments i la disponibilitat de material erosionable a la conca. Aspectes com la composició, resistència, deformabilitat, grau d'alteració i fracturació, porositat i permeabilitat

determinen la possibilitat que té el terreny de patir trencaments i desplaçaments sota l'actuació d'algun factor desencadenant. És per això que als massissos rocosos alterats i fracturats, aquestes condicions són determinants. Els materials més favorables per la formació de corrents d'arrossegalls són els dipòsits col·luvials, sòls de meteorització, dipòsits glacials, fluvials i volcànics. L'existència de plans de discontinuïtat que poden actuar com a superfícies de trencament també és determinant.

- *Climatologia.* D'una banda, les condicions climàtiques tenen influència al grau d'alteració i meteorització dels materials. Per exemple, en regions humides és freqüent la presència de gruixos considerables de materials alterats sobre dels substrats rocosos i de nivells freàtics elevats que influeixen decisivament en les condicions d'estabilitat. Per altra banda, la precipitació és el principal desencadenant d'esllavissades ja que fa disminuir el quocient entre forces estabilitzadores i forces desestabilitzadores.

La identificació de les zones més susceptibles a patir corrents d'arrossegalls, doncs, hauria d'integrar aquests aspectes. En aquest treball, s'ha posat l'accent als factors de relleu i la geomorfologia. Els altres factors s'han considerat de manera indirecta mitjançant el model físic que es descriurà més endavant (secció 4.1)

Com s'ha comentat, la inestabilitat del terreny es produeix com a conseqüència de canvis en el contingut d'aigua i la pressió intersticial. Es pot considerar que la pluja és el principal factor desencadenant de corrents d'arrossegalls. L'aigua de pluja crea fluxos superficials i subsuperficials en els vessants. En infiltrar-se, augmenta el contingut d'aigua de la zona no saturada i puja el nivell freàtic. Les variacions del contingut d'aigua depenen d'una banda de les característiques de la pluja (curta o prolongada, intensa o feble) i de la capacitat d'infiltració del sòl.

González de Vallejo et al. (2002) descriuen els efectes de l'aigua en el terreny i com es veuen modificades les propietats i resistència del sòl. En primer lloc, es duen a terme canvis mineralògics. En segon lloc, es produeix erosió interna i externa. En tercer lloc, l'aigua produeix canvis en l'estat tensional. Des del punt de vista de la resistència podem dir que aquests canvis en l'estat tensional són doblement negatius. Per una banda, es redueix la resistència al tall a causa de la generació de pressions intersticials i de la reducció de paràmetres resistents com ara la cohesió o la fricció interna. Per l'altra, augmenten els esforços de tall a causa de l'increment de pes del terreny i de la generació de forces desestabilitzadors en esquerdes i discontinuïtats.

2.2 Avaluació de l'amenaça

2.2.1 Sistemes d'alerta i susceptibilitat

Per tal de poder reaccionar davant de les situacions de perillositat, les administracions competents desenvolupen sistemes d'alerta i mapes de risc. Abans de continuar, val la pena

esmentar les diferències semàntiques entre els termes risc, amenaça i susceptibilitat, dels quals es pot fer la següent definició a tres nivells (Lee i Min, 2001) :

Susceptibilitat = $f(\text{esllavissada, factors condicionants})$

Possibilitat = $f(\text{susceptibilitat, agents desencadenants})$

Risc = $f(\text{possibilitat, béns exposats})$

En aquest treball, de manera similar a les definicions de Lee i Min (2001), s'adoptarà el terme susceptibilitat com una mesura de la potencialitat d'ocurrència quan no es tinguin en compte els agents desencadenants. En el moment en què es tinguin en compte aquests últims, que en el cas d'estudi es tracta de la pluja, s'adoptarà el terme *amença* com a traducció del terme anglès *hazard*. El risc, que integra la vulnerabilitat o el valor dels béns potencialment afectats, no s'ha tractat en aquest estudi.

Tot i els considerables esforços dedicats en els últims anys, les iniciatives d'avaluació de riscos es continuen topant amb una sèrie de mancances i dificultats (Carrara et al., 1999)

- L'avaluació de riscos és una operació intrínsecament complexa.
- Les dades apropiades són difícils d'obtenir.
- No es disposa de procediments estàndards i generalment acceptats per a l'avaluació de riscos naturals.

Carrara et al. (1999) consideren que els models d'avaluació d'amença haurien d'incorporar tant la magnitud de l'episodi com la seva freqüència temporal, aspectes en els que molts models fallen. Això significaria que per poder fer una predicció real caldria predir ocurrència, comportament del flux i paràmetres que el caracteritzen com ara volum, velocitat, pic de descàrrega i distància recorreguda.

En aquesta mateixa línia, Hürlimann et al. (2006) fan una interpretació del terme *hazard* com a funció de la intensitat de l'episodi i la probabilitat d'ocurrència, argumentant que la intensitat del fenomen, més que la seva magnitud, és la seva destructivitat.

No cal dir que l'escenari actual es troba bastant lluny d'aquest plantejament. El desenvolupament de les tecnologies de sistemes d'informació geogràfica (SIG) dels darrers anys és un exemple dels esforços fets de cara a un tractament de les dades més eficient. Aquests sistemes, a més de permetre manipular grans quantitats de dades d'una manera senzilla, permeten visualitzar-les d'una manera clara i entenedora. Desgraciadament, aquests avenços no poden suplir ni les deficiències en la comprensió i modelització del fenomen ni les mancances en les tècniques per obtenir dades. Moltes vegades, són els recursos econòmics el factor limitant alhora de poder disposar de dades de qualitat.

De totes maneres, tot i que els recursos econòmics fossin suficients, la manca de dades i la incertesa associada a aquestes és quelcom amb el què la ciència ha de conviure, ja que sempre hi ha tipus de dades que difícilment es podran aconseguir. Per exemple, registres espacials i temporals d'episodis passats en una regió. Sovint estan ben documentats episodis que han tingut

conseqüències nefastes sobre assentaments humans o han tingut repercussions econòmiques o en vides humanes. No obstant això, de la majoria d'episodis no en queda constància en cap tipus de registre, ja sigui perquè succeeixen en llocs poc accessibles i passen totalment desapercebuts o perquè no existeix tal protocol de seguiment a nivell d'administracions.

2.2.2 Metodologies d'avaluació d'amenaça

Malgrat les dificultats, la qüestió de l'avaluació de l'amenaça s'ha intentat abordar des de molts punts de vista. Dai et al. (2002) i Guzzetti et al. (1999) fan un esforç per resumir i comparar l'ampli ventall d'enfocaments i metodologies usades per a la creació de mapes d'alerta:

- **Inventari:** preveure el comportament futur a partir de la distribució dels episodis passats. A partir d'un inventari d'esllavissades i la seva ubicació en un mapa s'identifiquen les àrees són més susceptibles. Aquesta metodologia presenta l'inconvenient que només identifica les àrees on ja s'hi han observat esllavissades.
- **Heurístic:** a partir de l'opinió d'experts. Es parteix d'assumir que les variables que controlen el fenomen són conegudes, així com la seva importància relativa. Depèn totalment del grau de coneixement de l'investigador.
- **Estadístics:** es basen en analitzar la relació entre els episodis passats i les variables que intervenen en el fenomen mitjançant tècniques d'anàlisi multivariant com ara l'anàlisi discriminant, la regressió lineal o la regressió logística (Medina i Zappa, 2011). Es tracta de combinar les variables que han provocat esllavissades en el passat assumint que les causes que les van desencadenar seran les mateixes que les que provocaran esllavissades en el futur (Carrara et al., 2008). Dintre d'aquest grup s'hi podrien comptar també les xarxes neuronals. Aquestes permeten "entrenar" el model fins optimitzar-lo en una zona d'estudi (Lee et al., 2004; Ayalew et al., 2004).
- **Models geotècnics:** es basen en l'aplicació de les lleis físiques que governen les causes d'inicialització de corrents d'arrossegalls o la seva propagació. El rang d'aplicació d'aquests mètodes, a diferència dels anomenats anteriorment, es redueix a escala local, ja que tant el cost computacional com el nivell de detall de les dades requerides fan inviable una aplicació a escala regional. Un exemple són els models de simulació de propagació (Hürlimann et al., 2006)

2.2.3 Corbes lllindar

Una eina molt utilitzada per a previsió són les corbes lllindar. Un lllindar es defineix com un valor mínim o màxim d'una magnitud que s'ha d'igualar o sobrepassar per tal de que un sistema canviï d'estat. En el cas dels corrents d'arrossegalls o les esllavissades causades per la pluja, aquesta magnitud es refereix a l'episodi de pluja i el canvi d'estat és l'ocurrència del fenomen (Guzzetti et al., 2008).

Les magnituds referides a l'episodi de pluja en què es basen poden ser diverses: intensitat-durada, acumulació, acumulació-durada o acumulació-intensitat. Un aspecte clau en la definició dels llindars és la definició d'aquests termes. En el cas de la intensitat, per exemple, es pot referir a la intensitat mitjana de tot l'episodi o a la intensitat instantània. En realitat, a la literatura es troba un ventall tant gran de definicions d'aquests termes que a vegades la comparació entre diferents llindars es fa complicada (Guzzetti et al., 2008).

A grans trets, les corbes llindar es poden classificar en globals, regionals i locals. Els primers intenten ser aplicables a tot arreu, independentment de les característiques locals (Guzzetti et al., 2008). Les corbes regionals i locals, en canvi, es defineixen específicament per zones amb certes característiques climàtiques, geològiques i geomorfològiques. Com més específica és una corba, més representativa és però també més difícil d'extrapolar a altres regions.

Per tal de definir les corbes llindar existeixen dues metodologies: a partir de dades empíriques o a partir de models conceptuals. Els llindars empírics es defineixen a partir de registres de condicions de pluja que han ocasionat corrents d'arrossegalls i condicions de pluja que no n'han causat, de manera que s'ajusta la corba que millor separi els dos tipus d'episodis. Per altra banda, les metodologies conceptuals es basen en l'extensió en un territori de models físics d'inestabilitat utilitzats en l'àmbit de la geotècnia.

Els primers tenen l'avantatge de reflectir de manera fidedigna les condicions particulars de la conca, però per a tal efecte requereixen un registre extens d'episodis. Els segons tenen l'avantatge de poder preveure la localització i el moment esperat del corrent d'arrossegalls, cosa que els fa molt atractius per als sistemes d'alerta però necessiten informació espacial sobre les característiques hidrològiques, geològiques i morfològiques molt detallada i difícil d'obtenir.

CAPÍTOL 3

Marc d'estudi

3.1 Àrea d'estudi

L'estudi s'ha realitzat en els dos subdominis dels Pirineus orientals que es mostren en la Figura 2. El subdomini del nord-occidental es troba en el Pirineu axial, mentre que el subdomini sud-oriental es troba en el Prepirineu. L'àrea d'estudi cobreix al voltant de 2750 km² i compren subconques dels rius Llobregat, Ter, Noguera Pallaresa, Noguera Ribagorçana, Segre i Garona.

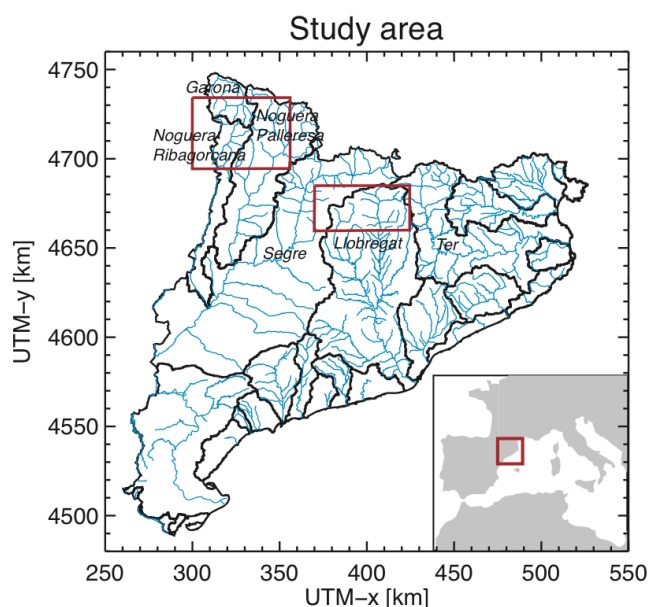


Figura 2. Àrea d'estudi i conques hidrogràfiques en les que se situa.

La regió gaudeix d'un clima amb molta variabilitat degut a la posició geogràfica entre zones de clima Mediterrani al sud i de clima continental al nord. En la zona d'estudi, amb cotes que oscil·len entre els 400 i els 3150 m d'altitud, el clima també està molt condicionat per l'orografia, sent aquest de tipus Mediterrani Prepirinenc Occidental a la part més meridional, Mediterrani Pirinenc Occidental més al nord i amb trets de clima oceànic a la conca de la Garona. L'amplitud tèrmica és gran, essent els estius suaus o calorosos i els hiverns freds. El règim pluviomètric també és divers i oscil·la entre els 700 i els 1200 mm l'any distribuïts de manera irregular amb

pics de pluja a l'estiu o a la primavera segons la zona, excepte en la zona de clima oceànic, on la distribució de pluges és més regular durant tot l'any¹.

L'àrea d'estudi es va fraccionar en subconques de drenatge a partir d'un model digital del terreny de 5mx5m (Chevalier, [-]). Com a conques es van considerar les àrees drenades superiors a 1 km². La divisió resultant contenia subconques de fins a ordre 5 segons la classificació de Strahler (Figura 3). No obstant, en aquesta tesina només s'han inclòs subconques de primer i segon ordre (Figura 4). El fet de negligir les conques d'ordre superior no hauria de ser una restricció major, ja que els corrents d'arrossegalls tendeixen a ocórrer en capçalera. La mida de les subconques estudiades varia entre 1 i 13 km² en les subconques de primer ordre i de 2 a 45 km² en les conques de 2n ordre.

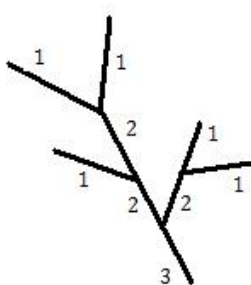


Figura 3. Classificació d'ordres segons Strahler. Font: elaboració pròpia

En particular s'han estudiat quatre conques d'ordre 1: Rebaixader i Torrent d'Erill a la comarca de l'Alta Ribagorça, Port Ainé a la comarca del Pallars Sobirà i Pratmajor (Port del Comte) a la comarca de l'Alt Urgell.

La conca del Rebaixader drena a la Noguera Ribagorçana, té una superfície de 3.9 km² i un pendent mitjà de 35°. En aquesta conca s'hi estan realitzant estudis des del Departament de Terreny, Cartogràfica i Geofísica de l'Escola de Camins de la UPC. Des de l'estiu de 2009, el sistema d'instrumentalització que hi ha instal·lat permet obtenir registres de dades a partir dels quals es pot deduir l'ocurrència de corrents d'arrossegalls (Batlle, 2011).

La conca del Torrent d'Erill contribueix també a la Noguera Ribagorçana, té una àrea de 3.1 i un pendent mitjà de 32°. Les imatges de satèl·lit permeten veure amb facilitat que es tracta d'una conca on hi ha hagut molta activitat recentment, ja que les cicatrius d'esllavissades es veuen amb molta claredat. En aquesta conca es coneix un corrent d'arrossegalls ocorregut el dia 22 de juliol de 2010 (Hürlimann, comunicació personal 2012).

La conca de Portainé forma part de la conca hidrogràfica de la Noguera Pallaresa. Té una àrea de 1.9 i un pendent mitjà de 22°. A igual que la conca del Torrent d'Erill, la nit del 22 a 23 de juliol de 2010 va haver un corrent d'arrossegalls (Hürlimann, comunicació personal 2012). Aquest no

¹ www.meteo.cat

es tracta d'un esdeveniment aïllat, sinó que en aquesta mateixa conca es té documentat un corrent d'arrossegalls el dia 12 de setembre de 2008 (Portilla et al., 2010).

Finalment, la conca de Pratmajor contribueix al riu Segre, té una àrea de 3.6 i un pendent mitjà de 15°. En un principi, en l'inventari de corrents d'arrossegalls no s'hi va detectar cap, però no es pot saber del cert si posteriorment n'hi han ocorregut.

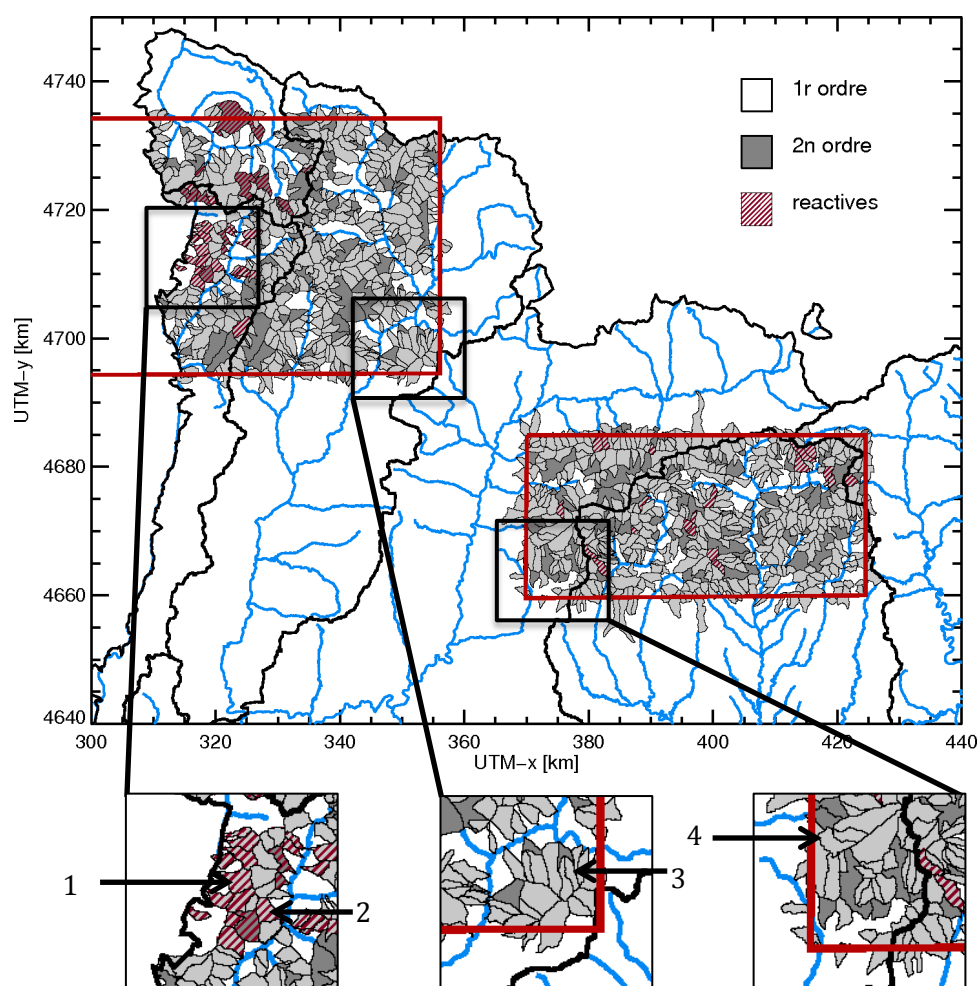


Figura 4. Subdivisió en conques de l'àrea d'estudi. Les conques reactives són aquelles en les que s'hi ha detectat corrents d'arrossegalls. A sota, les conques que s'han estudiat en particular: 1.Rebaixader 2.Torrent d'Erill 3.Portainé 4. Pratmajor

3.2 Dades de pluja

El sistema d'alertes dissenyat s'ha aplicat durant l'estiu de 2010, concretament durant els mesos de maig a octubre. D'aquests sis mesos se n'han seleccionat alguns episodis curts que han estat analitzats amb més profunditat. L'episodi del 21 al 23 de juliol s'ha anomenat episodi Pilot i s'ha utilitzat com a referència per il·lustrar el disseny del sistema d'alerta.

Aquests episodis curts s'han escollit a partir de l'estudi de Batlle (2011), en què es va realitzar un registre de corrents d'arrossegalls succeïts en aquest període en una conca instrumentalitzada de l'Alta Ribagorça. Aquesta conca forma part de les conques d'estudi i s'hi van registrar corrents d'arrossegalls en quatre dels sis episodis curts analitzats.

3.2.1 El camp de pluja radar

El fet de fer servir dades radar té tot un seguit d'avantatges respecte altres fonts de dades com són els pluviògrafs. Des d'un sol punt, el radar permet mesurar de manera remota fins a un radi d'aproximadament 150km i el producte que s'obté és un camp distribuït (dades a cada punt) a molt alta resolució (6 minuts). La gran virtut que té, doncs, és la de reproduir molt bé la forma del camp de precipitacions.

Per contra, és una mesura indirecta i en alçada, el que significa que no es mesura la precipitació sinó la reflectivitat, i que per obtenir la primera s'han de fet tot un seguit de conversions i correccions.

Per aquest estudi s'han utilitzat dades registrades amb el radar de Creu del Vent, que és un radar de banda C que pertany al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). Les dades de radar originals s'han processat per produir camps de pluja a la resolució d'1 km². A tal efecte s'han sotmès a una cadena d'algoritmes de control de qualitat i estimació quantitativa de la precipitació que inclou: (i) reducció dels efectes del bloqueig del feix del radar deguts a de l'orografia utilitzant la metodologia de Delrieu et al. (1995), (ii) eliminació d'ecos no meteorològics combinant les tècniques de Berenguer et al.(2006) i Sánchez-Diezma et al. (2001), (iii) identificació del tipus de precipitació i extrapolació de les mesures de reflectivitat en alçada a la superfície d'acord amb un doble perfil vertical de reflectivitat descrit a Franco et al. (2008), (iv) conversió de la reflectivitat a intensitat de pluja utilitzant una relació Z-R doble en funció del tipus de precipitació [la de Marshall-Palmer (1948) i la derivada a partir de mesures de disdròmetre per la zona de Catalunya (Sempere-Torres et al., 1997)] i (v) ajust a mesures de pluviòmetres per mitigar els efectes d'errors de calibració del radar i dels errors residuals en l'extrapolació a la superfície (Berenguer, 2011).

La comparació amb els registres del pluviògrafs dona garanties de que el radar ha funcionat correctament. Per cada episodi dels cinc seleccionats es mostra un diagrama de dispersió (Figura 5). La correlació és raonablement bona en tots els casos, tot i que en l'episodi del 9 i 10 d'octubre el radar subestima les acumulacions altes.

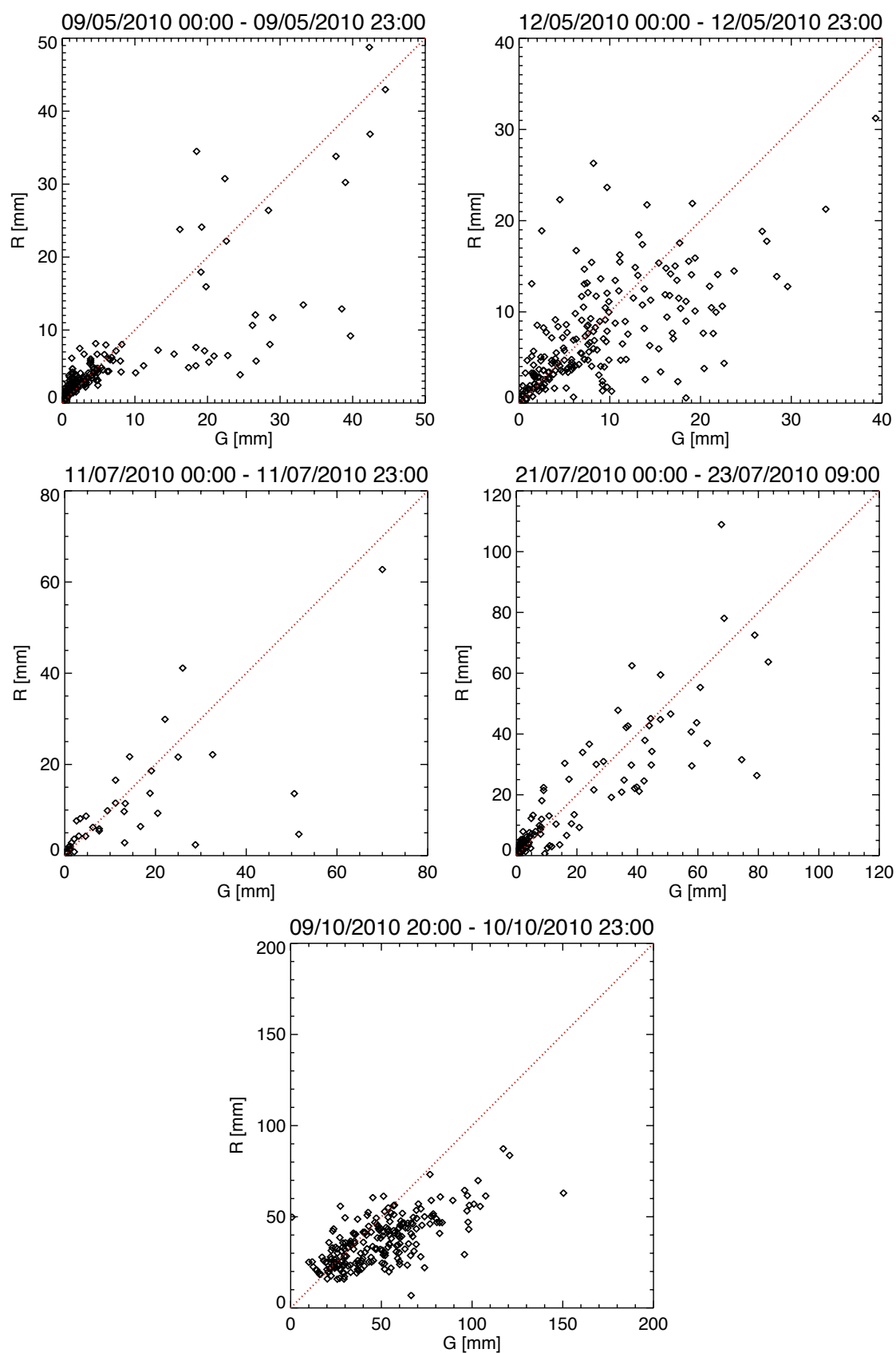


Figura 5. Diagrames de dispersió de les observacions dels pluviògrafs respecte el radar en els cinc episodis estudiats.

3.2.2 Episodis

A continuació es fa una breu descripció de cada un dels episodis escollits i es mostra l'acumulació en la zona d'estudi al final de cada episodi.

- Episodi 1: 09 de maig de 2010

L'episodi comença cap a les 0130 UTC del dia 9 de maig de 2010. Es tracta d'un sistema de precipitació provinent del sud-oest. En un inici presenta una intensitat baixa, però al voltant de les 1500 UTC comencen a aparèixer nuclis de més intensitat, arribant a assolir valors puntuals de més de 40 mm/h. L'episodi acaba a les 2300 UTC del mateix dia, deixant rere seu acumulacions que no arriben als 50 mm a la zona d'estudi (Figura 6).

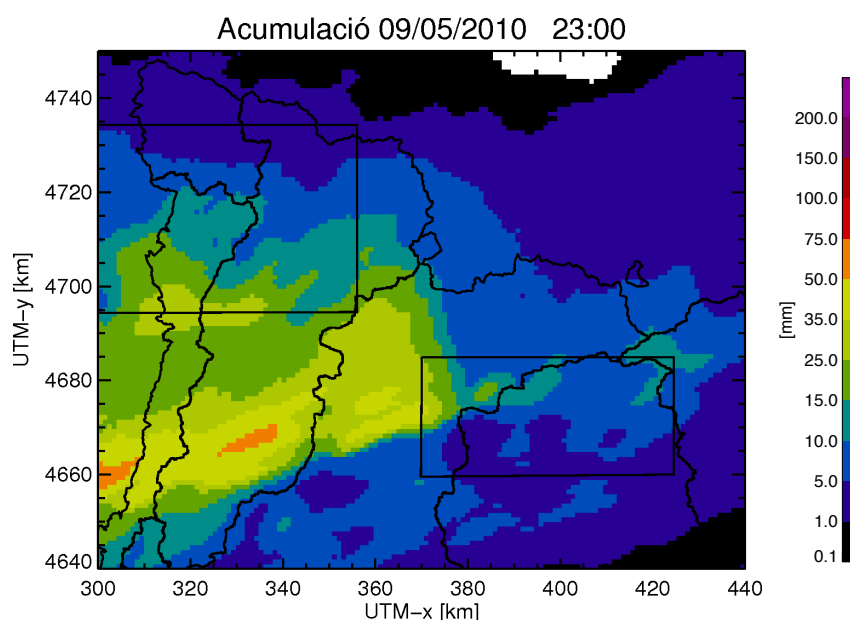


Figura 6. Pluja acumulada a les 2300 UTC del 09/05/2010

- Episodi 2: 12 de maig de 2010

En l'episodi del dia 12 de maig de 2010, un sistema que es mou de sud-oest a nord-est comença a afectar la zona d'estudi cap a les 0030 UTC. Es tracta d'un sistema estratiforme que afecta bona part de Catalunya. En la zona d'estudi, el sistema de precipitació deixa acumulacions màximes que no arriben als 35 mm i intensitats que només superen de manera molt puntual els 15 mm/h (Figura 7).

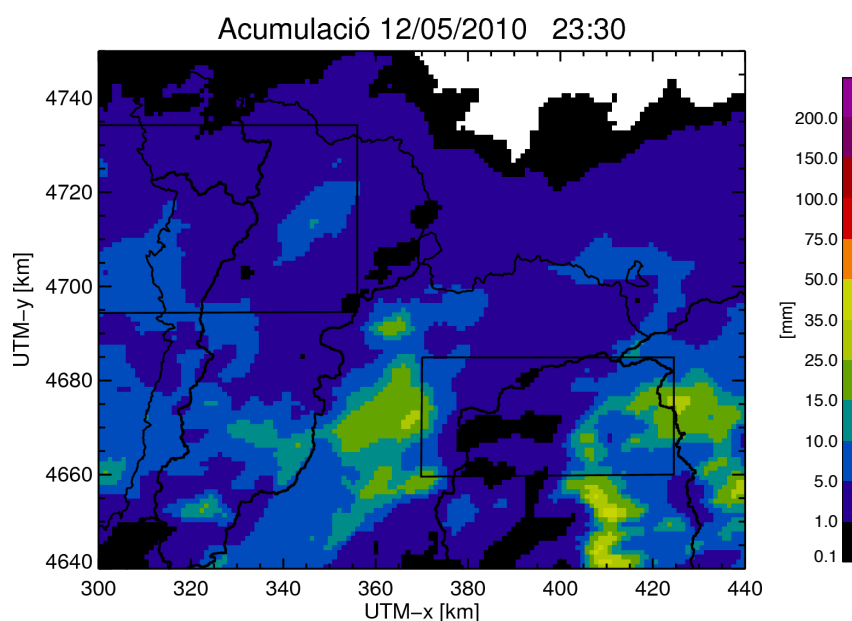


Figura 7. Pluja acumulada a les 2330 UTC del 12/05/2010

- Episodi 3: 11 de juliol de 2010

A partir de les 11 UTM del dia 11 de juliol es comencen a desenvolupar nuclis convectius de gran intensitat a la zona del Pirineu central. Al llarg de l'episodi, aquests nuclis convectius tendeixen a desplaçar-se lleugerament cap al sud i arriben a tenir intensitats superiors als 40 mm/h en diverses ocasions. A la zona d'estudi, l'episodi finalitza cap a les 2000 UTC amb acumulacions màximes observades de 100 mm (Figura 8).

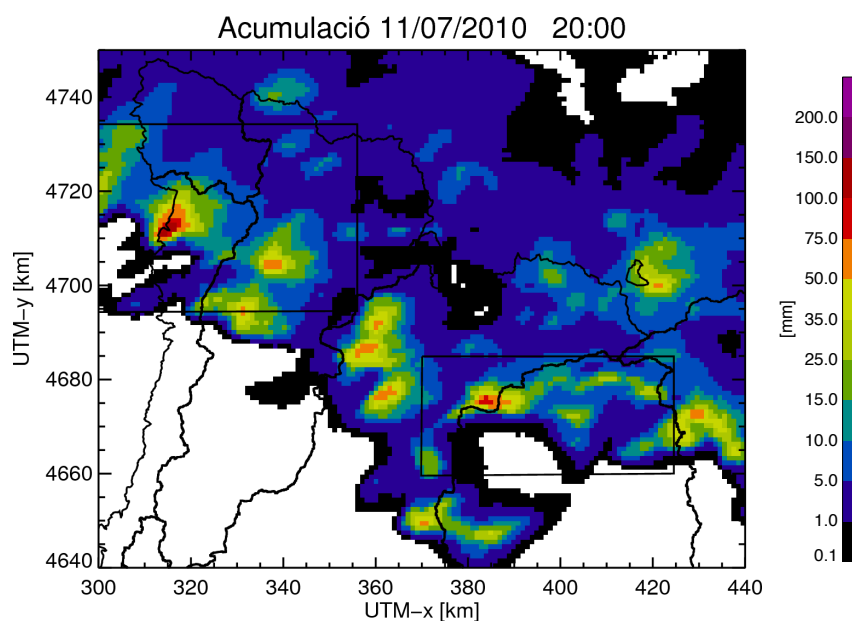


Figura 8. Pluja acumulada a les 20:00 UTC del 11/07/2010

- Episodi 4: 21-23 de juliol de 2010

L'episodi comença al voltant de les 1400 UTC del 21 de juliol de 2010. Al principi, l'episodi afecta només al nord-oest de Catalunya en forma de nuclis convectius d'intensitat moderada que es desplacen cap al nord-est. A mesura que avança el dia el sistema es generalitza arribant a afectar bona part del Principat. A partir de la tarda del dia 22 els nuclis convectius s'intensifiquen i es manté aquesta situació fins ben entrada la matinada del dia 23. A la zona d'estudi l'episodi acaba cap a les 0800 UTC del dia 23 de juliol (Figura 9).

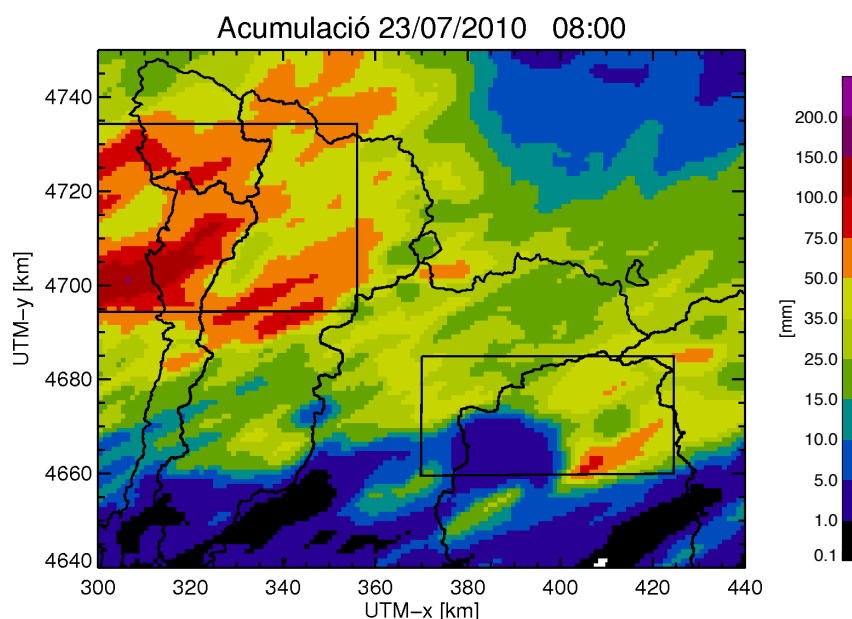


Figura 9. Pluja acumulada a les 0800 UTC del 23/07/2010 (episodi del 21/07/2010 al 23/07/2010)

- Episodi 5: 9-10 d'octubre de 2010

Cap a les 2030 UTC del dia 9 d'octubre de 2010 el sistema de precipitació provinent del sud comença a afectar la zona d'estudi amb nuclis d'intensitat superior als 40mm/h. Al llarg de la nit aquests es van atenuant, però la intensitat segueix sent moderada fins als volts de les 0800 UTC del dia següent, en què la pertorbació s'afebleix de forma considerable, però continua activa durant tot el dia. Les acumulacions màximes observades a l'àrea d'estudi al final del dia 10 d'octubre de 2010 superen els 40mm (Figura 10). En realitat l'episodi continua durant el dia següent, però només s'han considerat aquests dos dies perquè és quan es registra el corrent d'arrossegalls.

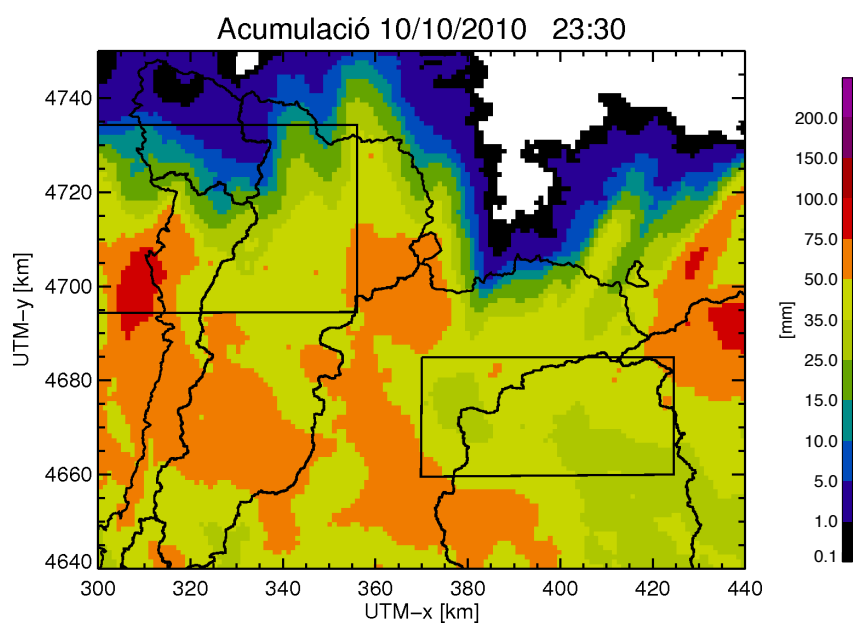


Figura 10. Pluja acumulada a les 23:30 UTM del 10/10/2010 (episodi del 09/10/2010 al 10/10/2010)

CAPÍTOL 4

ASPECTES PREVIS: PROJECTE IMPRINTS I DESCRIPCIÓ DE LES DADES

Com s'ha comentat a la introducció, aquesta tesina forma part d'un projecte més extens que utilitza els resultats de la feina feta fins ara. El projecte té per objectiu la construcció d'un sistema d'alerta mitjançant l'aplicació de regles a partir de dades de pluja. El desenvolupament del sistema es va dividir en cinc tasques:

1. Identificació de les variables a ser incloses al sistema basat en regles. Es va proposar un model físic per explicar la causa d'iniciació de corrents d'arrossegalls. A partir d'aquest model es van identificar les variables rellevants i se'n va estudiar el rang de valors i la seva distribució (Papa et al., 2010)
2. Desenvolupar diferents metodologies simplifiades per executar simulacions de corrents d'arrossegalls i flash floods.
3. Avaluar la potencial amenaça a partir de la simulació en escenaris hipotètics. Els models de simulació es van implementar per tal de trobar regles que relacionessin les condicions hidrometeorològiques amb la inestabilitat del terreny. Com a resultat es van obtenir corbes que relacionaven la inestabilitat de la conca amb la intensitat de pluja, la durada de l'episodi i la pluja antecedent (Bateman et al., 2010)
4. Desenvolupar un sistema basat en regles enllaçant les variables d'entrada i l'avaluació d'amenaça. A partir d'una anàlisi probabilístic es va buscar la relació entre les característiques geomorfològiques de les subconques i l'ocurrència de corrents d'arrossegalls en una zona d'estudi concreta per tal de trobar regles per predir la susceptibilitat de la subconca (Medina i Zappa, 2011).
5. Transformar les regles a lògica difusa. Aquesta última tasca és l'objecte d'aquesta tesina.

A continuació s'expliquen els resultats d'aquestes tasques dels què s'ha partit en aquesta tesina.

4.1 Model físic

El model físic es va basar en l'*infinite-slope stability analysis*, model basat en un factor de seguretat governat pels increments de pressió intersticial deguts als canvis de nivell d'aigua causats per la pluja. L'*infinite-slope stability analysis* permet calcular el factor de seguretat en un element genèric de la conca. Sigui Z la profunditat respecte la superfície i t el temps, el factor de seguretat es calcula dividint la força resistent donada per la teoria de Coulomb i les forces desestabilitzadores causades per la gravetat.

$$FS(Z, t) = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} + \frac{c - \psi(Z, t) \cdot \gamma_w \cdot \tan\phi}{\gamma_s \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha} \quad [1]$$

on ϕ representa l'angle de fricció interna, α el pendent, $\psi(Z, t)$ la columna d'aigua, que depèn de la profunditat i el temps, γ_w el pes específic de l'aigua i γ_s el pes específic del sòl.

Quan FS assoleix un valor més gran o igual que 1, es considera que el volum de sòl per sobre de Z és inestable. L'expressió permet veure una forta influència de la pressió d'aigua, que fa disminuir el factor de seguretat en augmentar el seu valor. L'expressió que modelitza $\psi(Z, t)$ no és gens trivial, i es detalla a Bateman et al.(2010) És interessant apuntar, però, que l'expressió final de $\psi(Z, t)$ depèn de la durada i la intensitat de l'episodi de pluja, de la intensitat de pluja antecedent a l'episodi, de la conductivitat hidràulica en les direccions perpendicular i paral·lela al pendent, del coeficient de difusivitat i del quocient entre l'àrea drenada i l'amplada de l'element mesurada en la direcció perpendicular al màxim pendent.

La identificació de paràmetres que intervenen en el model que s'acaba de fer permet ja distingir entre dues classes de variables. Per una banda, s'anomenaran “variables estàtiques” aquelles que descriuen característiques geomorfològiques de la conca i que no varien al llarg de l'episodi. Per altra banda, les “variables dinàmiques” són aquelles relacionades amb l'episodi de pluja. En aquest cas, són les que tenen a veure amb la pluja: durada, intensitat i pluja antecedent.

4.2 Elaboració de corbes ID

Un cop identificades les variables que intervenen en el procés físic, calia un mecanisme per relacionar de manera ràpida les condicions hidrometeorològiques (variables dinàmiques) amb la inestabilitat de la subconca. Amb aquest objectiu es va utilitzar el model físic per construir corbes llindar del tipus intensitat-durada com les que s'han presentat a la secció 2.2.3 (Medina i Zappa, 2011). Aquesta metodologia de basar les corbes llindar en el model físic es va escollir per no dependre d'un registre històric d'episodis que en la majoria dels casos no existeix.

Per aplicar el model físic es van provar dos procediments de simulació:

- *Model matricial*: consisteix en executar el model físic un gran nombre de vegades per a un element genèric de pendent, cada cop amb una combinació diferent de les variables

d'entrada, de manera que es cobreixi tot el rang de possibles valors que aquestes poden prendre a la zona d'estudi. La sortida per a cada execució és si l'element és estable o no, i el volum de material mobilitzable. Aquests resultats s'han d'elaborar per tal d'extreure'n regles.

- *RainT Model* (Rainfall Thresholds Estimator). En aquest cas, en les variables d'entrada ja es té en compte la distribució espacial dels paràmetres del sòl. Sovint, quan s'apliquen models físics es fan sobre una malla: es divideix el terreny en cel·les i s'implementa el model en cada una d'elles. Això requereix disposar d'una distribució espacial dels paràmetres del sòl molt acurada que no existeix excepte en situacions molt particulars. Per salvar aquest inconvenient, l'àrea d'estudi es va dividir en zones homogènies on es van considerar els mateixos valors per a les variables del sòl (Z_T , ϕ , c , γ_s , K_x i K_z) juntament amb un interval de confiança. El pendent i l'àrea drenada es van calcular mitjançant un model digital d'elevacions. D'aquesta manera, la subconca quedava representada per una matriu input de les variables estàtiques. Partint de la matriu de variables es va executar la simulació per a cada combinació de variables dinàmiques d'entrada. El resultat per a cada execució era el nombre total d'elements inestables i el volum corresponent de material detrític. Els resultats es van representar directament en una gràfica de manera que per a cada valor de pluja antecendent que representava les corbes intensitat-durada-% àrea inestable.

Cal remarcar que per l'objectiu del treball no és necessari conèixer el lloc exacte dels elements inestables dins la subconca, sinó determinar si aquesta es veurà afectada per tal de poder donar una alerta a les àrees susceptibles a patir els efectes, com ara les valls on hi ha assentaments humans.

El model RainT es va aplicar a dues conques, una a la regió de Destra (Itàlia), i l'altra a la conca del Llobregat (Bateman et al., 2010). Les corbes obtingudes per aquesta última regió són les que han estat utilitzades en la tesina (Figura 11).

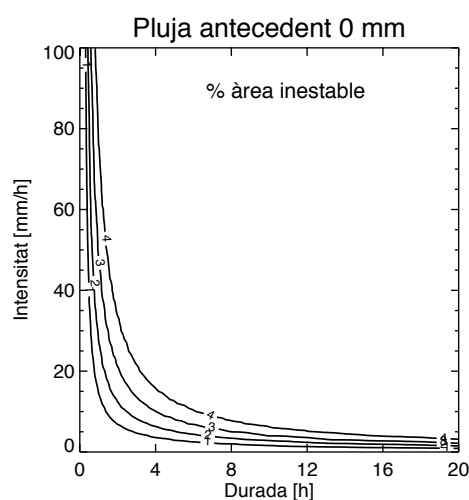


Figura 11. Les corbes llindar descriuen la relació entre intensitat de pluja, duració de la pluja i intensitat de la pluja antecendent amb el % d'àrea inestable de la subconca.

4.3 Característiques geomorfològiques i susceptibilitat

Com ja s'ha comentat, els corrents d'arrossegalls són el resultat de la interacció de fenòmens i característiques geològiques, geomorfològiques, antropogèniques i climatològiques. Si es volgués estudiar de manera precisa i exhaustiva caldria tenir en compte totes aquestes variables. A primera vista, sembla que restringir l'estudi de susceptibilitat a només un d'aquests camps és una visió massa incompleta del fenomen. No obstant, hi ha certs condicionants que fan que una anàlisi parcial d'aquest tipus pugui ser reveladora de cara a un millor coneixement d'aquesta amenaça. S'ha vist a partir del model físic, que la inestabilitat del terreny depèn de paràmetres del sòl com la cohesió, l'angle de fricció o la conductivitat hidràulica. Agafant el cas de la conductivitat hidràulica, ens trobem amb un paràmetre extremament difícil de mesurar de manera representativa a terreny, ja que presenta una enorme variabilitat espacial i els seus valors poden variar en ordres de magnitud en pocs metres. La variabilitat espacial té a veure tant amb les propietats granulomètriques del sòl com amb l'estructura del terreny. L'escala juga un paper molt important que fa que la determinació del paràmetre sigui tant complexa. Per exemple, un sòl o una roca poden ser molt impermeables si es miren uns pocs centímetres cúbics, però si s'augmenta en algun ordre de magnitud el volum de referència, per exemple a metres cúbics, l'estructura geològica o les fractures poden fer que a la pràctica el terreny es comporti d'una manera molt més permeable. Tampoc es pot oblidar l'anisotropia que presenta la conductivitat hidràulica.

En conclusió, podem dir que de moment no existeix manera de conèixer aquest paràmetre d'una manera prou precisa en àrees extenses, de manera que encara que un model basat en la conductivitat representi la realitat a la perfecció, la poca qualitat de les dades de partida fa que els resultats tinguin un gran marge d'incertesa.

L'alternativa que es presenta en aquest projecte és caracteritzar les subconques a partir de paràmetres geomorfològics que, tot i proporcionar una informació més indirecta de les condicions propícies a corrents d'arrossegalls, són fàcilment calculables a partir d'un model digital d'elevacions (MDE). La intenció és identificar condicions necessàries que han de complir les subconques per tal de ser escenaris potencials de corrents d'arrossegalls. Per exemple, en una conca amb molt poc pendent serà difícil tant que es produeixi inestabilitat com que el terreny mobilitzat es propagui sense ser amortiguat i frenat.

Per tal de detectar tendències en la susceptibilitat, es van estudiar dues àrees concretes en el Pirineu (Chevalier, [-]). A partir de sobreposar un inventari de corrents d'arrossegalls i la divisió de subconques, es van classificar les conques en reactives i no reactives (Taula 1). El terme "reactiu" reforça una idea bàsica d'aquest estudi que és considerar el corrent d'arrossegalls com una reacció o una resposta davant d'un estímul (precipitació).

L'inventari de corrents d'arrossegalls es va fer identificant cicatrius i dipòsits de corrents d'arrossegalls mitjançant fotografia aèria. Cada traça identificada es va representar en un mapa amb un punt localitzat en el punt més alt de la cicatriu de l'esllavissada. L'inventari consta de 170 traces de corrents d'arrossegalls entre les dues àrees d'estudi (Chevalier, [-]).

Taula 1. Subconques reactives i no reactives. Font: elaboració pròpia a partir de Medina i Zappa (2011)

Ordre de la conca	Conques reactives	Conques no reactives	Total
Ordre 1	42	853	895
Ordre 2	15	148	163

Paral·lelament es va elaborar una col·lecció de variables geomorfològiques derivades a partir del model digital del terreny (Chevalier, [-]). Algunes d'aquestes variables, com per exemple el pendent mitjà van ser calculats per a cada cel·la i promitjats entre totes les cel·les de la subconca. El paràmetre anomenat *reactivitat* és una variable booleana que representa la presència o absència de corrents d'arrossegalls inventariats a la subconca. Es va obtenir sobreposant la capa de subconques amb la capa de corrents d'arrossegalls (veure Figura 4). El fet d'utilitzar valors únics per tota una subconca és una simplificació important ja que s'està assumint que el valor la variable és uniforme quan en la realitat pot tenir una variabilitat enorme. Com a contrapunt, el fet de reduir el cost computacional permet una anàlisi a escala regional, que és un dels requeriments del projecte.

Per tal de determinar en quina mesura aquestes característiques geomorfològiques són rellevants en la formació de corrents d'arrossegalls i per estudiar de quina manera es poden combinar per tal de preveure la reactivitat de les subconques es va recórrer a diferents mètodes d'anàlisi estadística. Concretament, es va realitzar una anàlisi de components principals i es van aplicar metodologies de data mining (Medina i Zappa, 2011).

Taula 2. Definició de les variables estàtiques (Medina i Zappa, 2011).

Variable geomorfològica	Descripció
Àrea (A)	Superfície de la subconca
Longitud del curs (l)	El curs comença a partir de 1 km ² d'àrea drenada
Cota màxima (h_{max})	Cota màxima de la subconca
Cota mínima (h_{min})	Cota mínima de la subconca
Cota mitja	Cota mitja de la subconca
Orientació mitja	Els valors de 0 i 360 indiquen la direcció nord
Pendent mitjà	Pendent mitjà de la subconca
Melton ratio	$(h_{max} - h_{min})/\sqrt{A}$
Factor de forma	A/l^2
Basin elongation	$2 \cdot \sqrt{A}/l \cdot \sqrt{\pi}$
Lemniscate ratio	$l^2 \cdot \pi/4 \cdot A$
Perímetre (P)	Perímetre de la subconca

Variable geomorfològica	Descripció
Eix major	D'una elipse quan s'adapta a la forma de la conca
Eix menor	D'una elipse quan s'adapta a la forma de la conca
Major -menor	Eix major/ eix menor
Exutory slope	Pendent del curs en 50 metres a la sortida de la subconca per representar el pendent del con de dejecció o lloc d'acumulació de debris.
Pendent 200 metres	Pendent del curs al llarg de 200m
Pendent mitjà del curs	Pendent al llarg de tot el curs

4.4 Disseny del sistema d'alerta

En les seccions anteriors s'ha descrit principalment com s'obtenien corbes intensitat-durada-pluja antecedent i com s'han analitzat les conques a partir de les seves característiques geomorfològiques. El pas que queda és integrar tot aquest coneixement en un sol sistema d'alerta. Com s'ha comentat a l'inici d'aquest mateix capítol, això correspon a la cinquena tasca del projecte i és la que s'ha desenvolupat en aquesta tesina.

El sistema d'alerta ha de proporcionar un nivell d'alerta d'amenaça a cada conca de la zona d'estudi i en cada pas de temps. S'han definit tres nivells o categories d'amenaça: amenaça *alta*, *moderada* i *baixa*. Els criteris per assignar una categoria d'amenaça o una altra es basen en la combinació de dos aspectes: la susceptibilitat i la magnitud de l'episodi de pluja. La susceptibilitat de cada conca és avaluada a partir de les seves característiques geomorfològiques i la magnitud de l'episodi és avaluada a partir de les dades de pluja radar i les corbes intensitat-durada-pluja antecedent presentades.

Per avaluar aquests aspectes i combinar-los s'ha dissenyat un classificador que utilitza lògica difusa. Per tal d'assentar els fonaments teòrics de lògica difusa en els que s'ha basat, el Capítol 5 presenta una introducció als conceptes claus d'aquesta teoria. En el Capítol 6 es prosseguirà amb la descripció del classificador en si.

CAPÍTOL 5

LÒGICA DIFUSA

5.1 Introducció a la lògica difusa. Motivació

La ciència sempre ha intentat descriure la natura d'una manera el més exacta possible mitjançant fórmules i lleis matemàtiques. Els models, però, funcionen en un univers idealitzat i quan es transporten a l'esfera de la realitat topen amb incertesa i imprecisions. La incertesa sovint es considera quelcom indesitjable i es confia que a mesura que avanci el coneixement aquesta vagi sent eliminada. Altres vegades, es reconeix que la incertesa i la imprecisió són característiques inherents als sistemes naturals i es busquen estratègies per integrar-les als models científics.

Un dels reptes dels models és trobar un equilibri entre la robustesa i coherència matemàtica i el realisme. Moltes vegades el fet d'aconseguir una major precisió del model obliga a incrementar-ne la complexitat però això no sempre es correspon amb una "major veritat".

De manera natural expressem les idees amb conceptes abstractes i conjunts amb límits poc precisos. Moltes vegades, donat un context, una observació com *el cafè està molt calent* ens dóna informació tant o més vàlida que *el cafè està a 65'8°C*. En descriure dades també fem servir expressions com *una correlació alta o poc estable*.

De la necessitat de poder incorporar tot aquest coneixement "difús" (borrós, no precís) però valuós als models va néixer la teoria de conjunts difusos el 1965 i ha estat desenvolupada d'ençà per nombrosos autors tant a nivell teòric com aplicat (Dubois i Prade, 1998; Mendel, 1995; Bárdossy i Duckstein, 1995). El terme difús és la traducció de l'anglès *fuzzy*, i es refereix a quelcom no precís, amb fronteres no ben delimitades. Per tal d'operar amb conjunts difusos s'ha desenvolupat el que s'anomena lògica difusa, en anglès *fuzzy logic*, que ve a ser una generalització de la lògica dual clàssica.

La lògica difusa permet treballar amb sistemes complexos d'una manera flexible i transparent. Els sistemes basats en lògica difusa no són els més adequats si es busca una gran exactitud en el model, però la simplicitat i rapidesa computacional fan que sigui molt utilitzada en camps molt diversos. La majoria són sistemes de regles difuses, en anglès *fuzzy-rules*. Algunes de les aplicacions més destacades són els sistemes de control, presa de decisions, classificadors, etc. La

lògica difusa també té un gran potencial en disciplines que combinen ciències pures amb ciències experimentals o socials com ara l'ecologia, l'economia o la geofísica.

Els sistemes amb regles difuses es comparen sovint amb les xarxes neuronals. Els dos sistemes tenen en comú la capacitat de descriure sistemes complexos amb relacions no lineals. La principal diferència és que les xarxes neuronals són sistemes de caixa negra mentre que les regles difuses són explícites i transparents.

5.2 Funcions de pertinença

Un conjunt difús és un conjunt d'objectes sense fronteres clarament marcades o sense característiques ben definides. En la teoria de conjunts clàssica, donat un conjunt A i un objecte x , existeixen dues possibilitats: o bé l'objecte pertany al conjunt o no hi pertany. En canvi, en la teoria de conjunts difusos un objecte pot pertànyer *parcialment* a un conjunt.

Els conjunts difusos es defineixen per la seva funció de pertinença, que acostuma a estar normalitzada de manera que pren valors entre 0 i 1. Sigui A un conjunt i x un objecte, el grau de pertinença $\mu_A(x)$ descriu en quina mesura l'objecte x pertany al conjunt A , sent 1 el valor de plena pertinença. Es pot considerar la funció de pertinença com la generalització de la teoria de conjunts "clàssica". En aquest últim cas, μ_A només pren dos valors: 1 si x pertany a A i 0 en cas contrari.

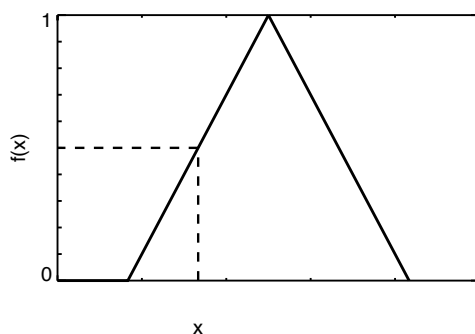


Figura 12. Funció de pertinença triangular que defineix el grau de pertinença d'un objecte x a un conjunt A .

Posem pel cas que volguéssim definir el conjunt de persones grans. A partir de quina edat hauríem de considerar que una persona és gran? Està clar que dependrà del context, societat i fins i tot de la persona que faci la classificació. I encara que tothom es posés d'acord per establir una edat llindar, això no representaria bé la realitat perquè no existeix cap edat a partir de la qual una persona és gran sobtadament: una persona *es fa* gran. El fet que el subconjunt *persones grans* no tingui una frontera precisa plasma una noció de progressivitat.

La definició de funció de pertinença dóna peu a diversos matisos en la interpretació que van lligats a l'aplicació que se'n fa. El significat més clàssic és el de similitud: en quin grau un element

s'assembla a un prototip representatiu del conjunt. Un altre significat és el de *plausibilitat*: en quin grau és possible o creïble que l'element pertanyi al conjunt, o en quin grau és veritat l'afirmació x pertany a A .

Sovint es compara la teoria de lògica difusa amb la teoria de probabilitat. En un primer moment és força intuïtiu relacionar les funcions de pertinença amb les funcions de densitat probabilitat. En canvi, les diferències són notables. Per exemple, la funció de densitat està normalitzada per l'àrea sota la corba, mentre que la funció de pertinença ho està respecte el seu valor més alt. En quant al seu significat, la diferència és vital. Mendel (1995) ho expressa molt clarament amb el següent exemple:

Sigui L el conjunt de tots els líquids potables. Es tenen dues ampolles etiquetades que contenen un líquid. A l'etiqueta de l'ampolla A es llegeix: $P[A \in L] = 0,9$ mentre que a l'etiqueta de l'ampolla B està escrit: $\mu_L(B) = 0,9$. En cas de molta necessitat, de quina beuries abans? El fet que el grau de pertinença de B sigui $0,9$ fa pensar que el líquid contingut s'acosta molt a ser potable. Es podria tractar per exemple d'aigua tèrbola, però mai seria quelcom com àcid clorhídric. De l'ampolla A , en canvi, si tinguéssim l'oportunitat de repetir l'experiment s'esperaria que fos potable en un 90% dels casos. En el 10% restant, però, es podria tractar de qualsevol cosa, per exemple, àcid corrosiu.

Una altra gran diferència amb la teoria de probabilitat és que donat un conjunt A i el seu complementari \hat{A} , $\mu_A(x)$ i $\mu_{\hat{A}}(x)$ no tenen per què sumar 1. Dit d'una altra manera, un element pot pertànyer alhora a un conjunt i també al seu complementari. Per exemple, algú pot considerar que el color turquesa és color blau, mentre que algú altre el pot classificar com un to de verd. Els conjunts difusos permeten que el color turquesa sigui blau i verd alhora; les dues afirmacions són igualment vàlides i no excloents.

El disseny de funcions de pertinença és un dels aspectes més crucials en un sistema de lògica difusa i també un dels més controvertits ja que no hi ha un consens generalitzat pel que fa als criteris a seguir ni tampoc una metodologia sistemàtica per al seu disseny. En general es distingeixen dues visions al respecte. La primera es basa en el criteri d'experts. En aquest cas les funcions de pertinença són subjectives i les formes que tendeixen a adoptar són simples, com ara triangulars o trapezoïdals. La segona visió es basa en criteris objectius. Una possibilitat seria usar les funcions de freqüència de la mostra de dades disponible directament com a funcions de pertinença. També hi ha una solució mixta, en la que les funcions estan basades en la mostra i ajustades segons el criteri expert.

5.3 Operadors

Sovint s'interpreta la lògica difusa com una generalització de la lògica dual, de manera que els operadors difusos són comparables als seus anàlegs de la lògica dual. Els operadors unió, intersecció, complementari i implicació continuen tenint el mateix significat, però l'àlgebra que

hi ha al darrera presenta diferències substancials. D'aquests operadors n'existeixen diverses definicions i l'ús d'un o l'altre depèn de l'aplicació i la preferència del modelador.

Una diferència fonamental és que en l'àlgebra dual es compleixen un seguit de lleis que en la lògica difusa es veuen trencades. Algunes d'elles s'esmenten a la Taula 3.

Taula 3. Lleis de la lògica dual

Lleis de la lògica	Expressió	
Principi de contradicció	$A \cup \bar{A} = U$	(1)
Principi del tercer exclòs	$A \cap \bar{A} = \emptyset$	(2)
Idempotència de la intersecció i la unió	$A \cap A = \emptyset \quad A \cup A = U$	(3)
Distributivitat mútua de unió i intersecció	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$	(4)

Existeixen diverses definicions per als diferents operadors. La Taula 4 mostra algun exemple de definicions de parelles d'operadors intersecció i unió. En l'última columna d'aquesta taula es mencionen quines de les propietats descrites anteriorment no es compleixen (Dubois i Prade, 1998). Per aprofundir en els formalismes de l'àlgebra difusa, veure Bárdossy i Duckstein (1995).

Taula 4. Diferents parelles t-norma i t-conorma.

	Intersecció	Unió	Propietats violades
Mínim/màxim	$\min(\mu_F, \mu_G)$	$\max(\mu_F, \mu_G)$	[1] i [2]
Producte/suma algebraica	$\mu_F * \mu_G$	$\mu_F + \mu_G - \mu_F * \mu_G$	totes

5.4 Aplicació de la lògica difusa al classificador

Un cop entesos els conceptes claus de la lògica difusa i s'ha apreciat el seu potencial, cal veure de quina manera s'aplica al cas del classificador.

En l'esbós del classificador fet en la secció 4.4, s'ha comentat que s'utilitzarien diverses variables (característiques geomorfològiques) per avaluar la susceptibilitat (de la qual es defineixen categories: *susceptibilitat alta, moderada i baixa*) i que aquesta seria un criteri per assignar una certa amenaça. Si es considera una variable aïllada (per exemple el pendent mitjà de la conca), aquesta contribueix en un cert grau a que la conca sigui més susceptible o menys. És força intuïtiu pensar que un pendent alt afavorirà que la conca sigui susceptible, però, a partir de quin pendent es considerarà que la conca és té una susceptibilitat *alta*? Es podrien mirar els casos registrats de corrent d'arrossegalls i extreure'n un llindar, però està clar que sempre serà difícil establir un valor frontera. En canvi, si s'utilitza lògica difusa, es pot definir una funció de

pertinença tal, que com més alt sigui el pendent, augmenti també el grau de pertinença a la categoria *susceptibilitat alta*.

El classificador, però, no es limita a considerar una sola variable sinó que la gràcia està en combinar-ne diverses. Mitjançant els operadors difusos és possible de combinar les diferents variables a partir dels seus graus de pertinença d'una manera molt flexible. Els operadors lògics permeten també introduir un sistema de regles. D'aquesta manera, tot i que el classificador dissenyat no és un model físic, aquesta flexibilitat permet copsar la física que hi ha darrera el fenomen i introduir els coneixements experts del modelador.

CAPÍTOL 6

DISSENY DEL CLASSIFICADOR

L'objectiu d'aquest apartat és el disseny d'un classificador per a l'avaluació de l'amenaça de corrents d'arrossegalls utilitzant conceptes de lògica difusa. Partint de la informació de les variables estàtiques i dinàmiques (secció 4.2 i 4.3), el classificador ha de ser capaç de donar com a resultat el nivell d'amenaça en una determinada subconca. Pel nivell d'amenaça s'han definit tres categories: *amença alta*, *moderada* i *baixa*. El nivell d'amenaça depèn de la susceptibilitat de la conca i de la magnitud de l'episodi de pluja. La Figura 13 mostra un esquema general del classificador.

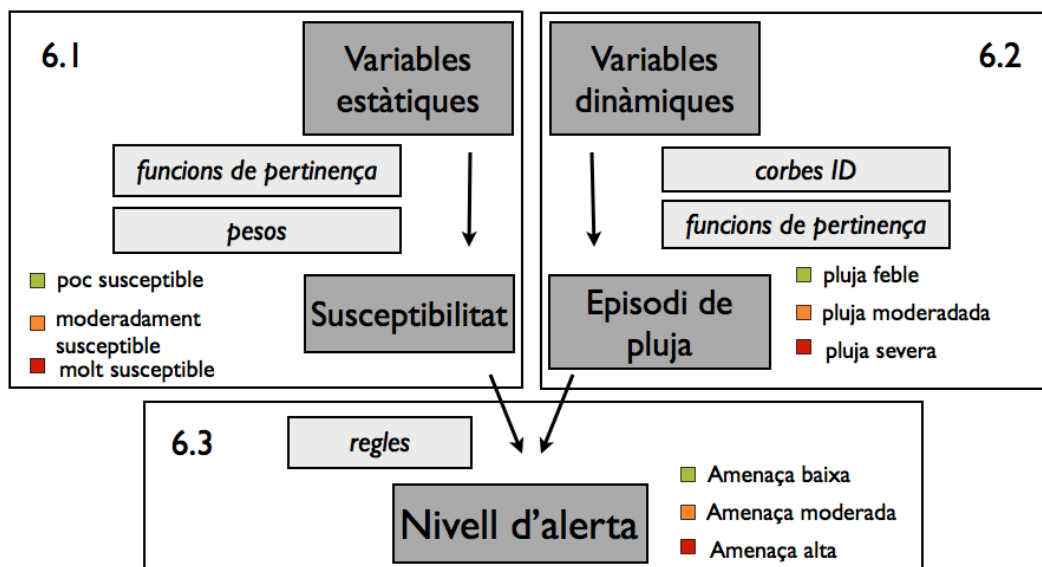


Figura 13. Esquema general del classificador

La susceptibilitat s'entén com la predisposició a que en aquella conca hi succeeixin corrents d'arrossegalls, de manera que davant del mateix episodi de pluja, una conca molt susceptible tindria més "possibilitat" de reaccionar que una poc susceptible. S'han definit tres categories de susceptibilitat: *poc susceptible*, *moderadament susceptible* i *molt susceptible*. A partir de combinar les variables estàtiques s'ha trobat un grau de pertinença a cada categoria de susceptibilitat.

Com s'ha explicat al capítol 4, les variables estàtiques són aquelles que no varien durant l'episodi i en aquesta tesina es refereixen als paràmetres geomorfològics.

Per altra banda, la magnitud de l'episodi de pluja també es particularitza per a una conca amb els graus de pertinença a les tres categories de pluja: *feble*, *moderada* i *severa*. La magnitud de l'episodi de pluja es mesura amb el % d'àrea inestable en la conca donades unes condicions d'intensitat de pluja, durada i pluja antecendent. El % d'àrea inestable s'obté aplicant les corbes ID definides a partir del model físic (Figura 11)

6.1 Càlcul de la susceptibilitat

La Figura 14 presenta un esquema del procediment utilitzat per calcular la susceptibilitat en el que s'han distingit quatre fases:

- Fase 1. S'ha realitzat una anàlisi de les variables estàtiques i s'ha escollit quines han d'intervenir en el classificador així com el seu pes relatiu. Aquesta anàlisi es descriu detalladament a la secció 6.1.1.
- Fase 2. Per a cada variable triada s'han construït les funcions de pertinença, una per cada categoria de susceptibilitat. El disseny de les funcions de pertinença es descriu detalladament a la secció 6.1.2
- Fase 3. Donada una conca, les funcions de pertinença permeten atorgar-li un grau de pertinença a les diferents categories de susceptibilitat en funció dels valors que prenen les seves variables.
- Fase 4. Es combinen les variables calculant grau de pertinença agregat com la suma ponderada dels graus de pertinença a cada una de les variables (Equació 2). Per la suma ponderada s'han utilitzats els pesos (α_i) trobats a la fase 1 (Taula 5). D'aquesta manera, a una subconca en particular se li acaba assignant un sol grau de pertinença μ_j a cada categoria, que és la combinació dels graus de pertinença a aquella classe que li atorgaven cada una de les variables $\mu_{i,j}$.

$$\mu_j = \sum_{i=1}^v \alpha_i \mu_{i,j} \quad [2]$$

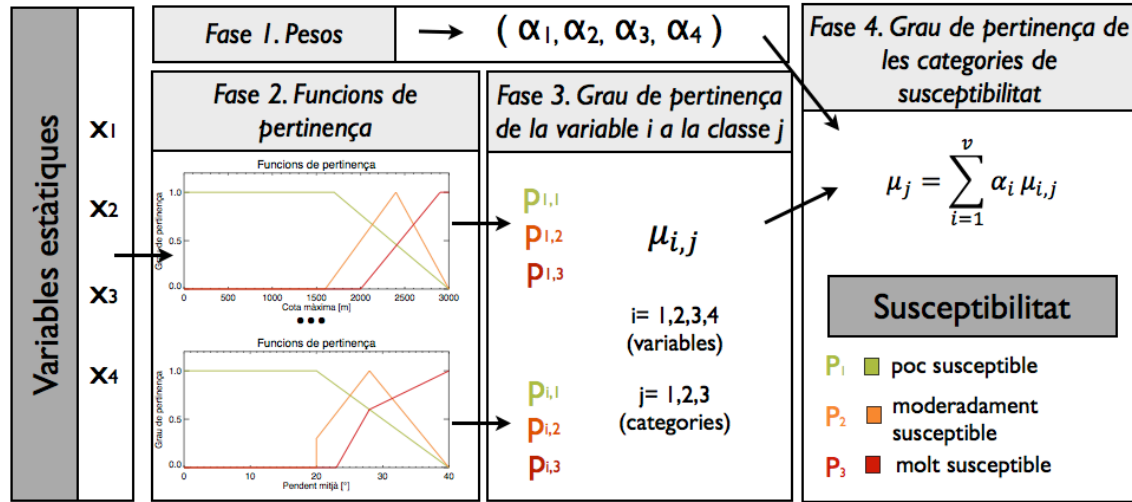


Figura 14. Esquema del càlcul de susceptibilitat

6.1.1 Anàlisi de les variables estàtiques

L'objectiu de l'anàlisi de les variables estàtiques és concloure quines variables de les 18 variables estàtiques exposades a la taula 2 són més rellevants per a l'ocurrència de corrents d'arrossegalls per tal d'incloure-les al classificador. A part d'això, s'han d'establir els pesos relatius d'aquestes variables (fase 1 de la Figura 14).

Per tal d'analitzar el comportament de les conques d'estudi, s'han analitzat els histogrames i distribucions de probabilitat condicionada de les 18 variables. La Figura 15 mostra les gràfiques de quatre de les variables, que finalment s'han trobat més rellevants tant en el present estudi com en la literatura.

Mitjançant l'equació 3 s'ha calculat la probabilitat que una conca sigui reactiva sabent que la variable pren un valor dins un interval determinat (Figura 15a). Per altra banda, mitjançant l'equació 4 s'ha calculat la probabilitat que una variable prengui un valor en un interval determinat sabent la reactivitat de la conca, que és equivalent a calcular la freqüència normalitzada (Figura 15b). Així, sigui C_i un interval de l'histograma,

$$P[x \subset reactiva | x \subset C_i] = \frac{P[(x \subset C_i) \cap (x \subset reactiva)]}{P[x \subset C_i]} = \frac{n^\circ \text{ conques reactiva de } C_i}{n^\circ \text{ conques de } C_i} \quad [3]$$

$$P[x \subset C_i | x \subset reactiva] = \frac{P[(x \subset C_i) \cap (x \subset reactiva)]}{P[x \subset reactiva]} = \frac{n^\circ \text{ conques reactiva de } C_i}{n^\circ \text{ conques reactiva}} \quad [4]$$

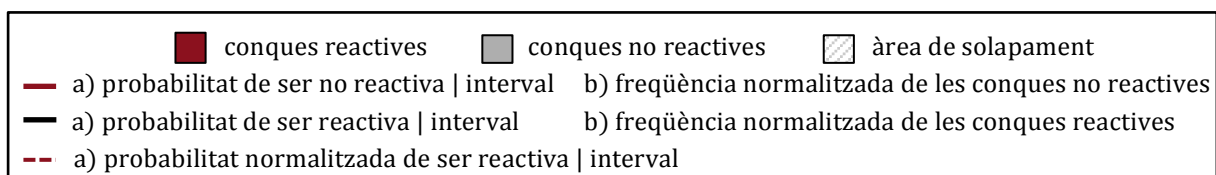
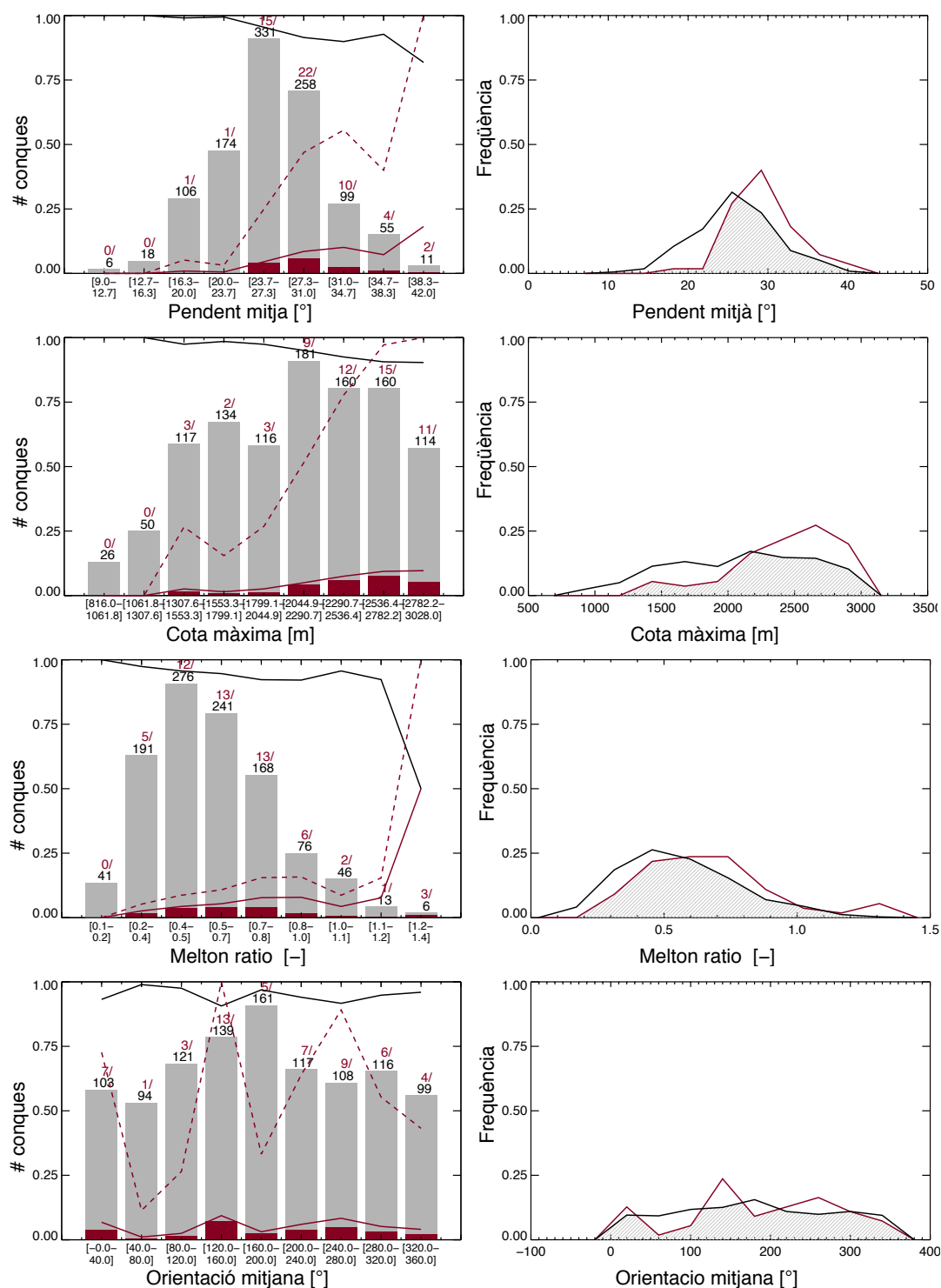


Figura 15. Esquerra(a): Histograma i probabilitat condicionada al valor de la variable (equació 3) Dreta(b): probabilitat condicionada a la reactivitat (equació 4) De dalt a baix: pendent mitjà, cota màxima, Melton ratio i orientació mitjana.

Per altra banda, a més del criteri de la menor àrea de solapament, s'ha volgut fer cas a la literatura, i és per això que es va voler donar importància a l'orientació mitjana de la conca. Hi havia tres variables que es trobaven en una posició més favorable que l'orientació mitjana: el pendent dels últims 200m, l'elongació de la conca i el perímetre. En els tres casos s'ha descartat la utilització d'aquesta variable en favor de l'orientació mitjana per dos motius. El primer motiu és que la relació entre la variable i la susceptibilitat de la conca està menys justificada des d'un punt de vista físic. El segon motiu és les característiques de la distribució de les dades, que feien difícil l'elaboració de conclusions o la identificació de tendències clares.

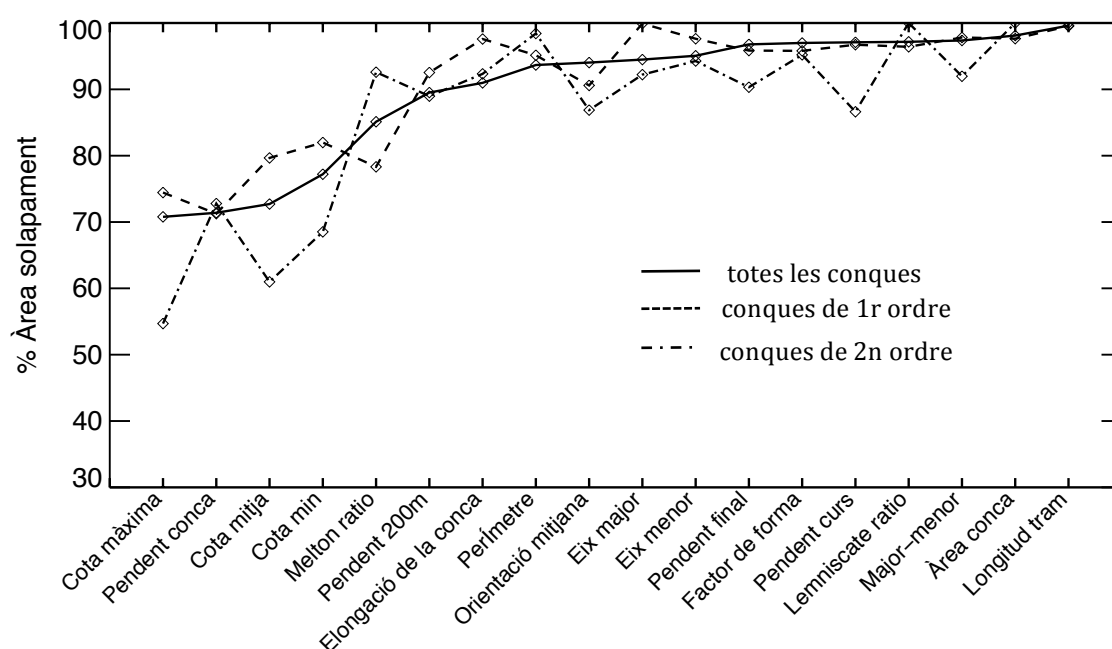


Figura 16. Comparació de l'àrea de solapament de les corbes de freqüència normalitzada. Les variables estan ordenades de menor a major àrea de solapament.

A continuació es justifiquen les variables escollides en base a la literatura:

- *Pendent*. És una de les variables que més clarament afecta a l'ocurrència de corrents d'arrossegalls i un component essencial de l'anàlisi d'estabilitat un talús (Equació 1). Com més pendent, el factor de seguretat disminueix i el perill d'inestabilitat augmenta. No obstant, els sòls amb una elevada cohesió o un elevat coeficient de fricció interna, així com les parets de roca mare poden mantenir-se estables malgrat presentar angles elevats. Nombrosos estudis contemplen el pendent com una de les variables causants de corrents d'arrossegalls més rellevants (Lee i Min, 2001). Fins i tot, en àrees d'estudi reduïdes és habitual observar un valor llindar a partir del qual succeeixen corrents d'arrossegalls.
- *Melton ratio*. Es defineix com $(h_{max} - h_{min})/\sqrt{A}$. Aquesta variable ha estat utilitzada en altres estudis per detectar conques susceptibles a riudes. Concretament, Wilford et al.

(2004), en el seu estudi realitzat a les muntanyes rocalloses canadenques, li trobava una gran utilitat per a distingir entre conques propenses a corrents d'arrossegalls i a fluxos hiperconcentrats (*debris flood*), especialment en combinar-la amb la variable longitud de la conca. També determinava que el valor llindar a partir del qual les subconques passen a ser propenses a patir corrents d'arrossegalls era de 0,6. Aquest resultat és coherent amb els valors trobats en els estudis mencionats anteriorment, però de totes maneres, aquests valors s'haurien d'adaptar segons les condicions de cada regió. La distinció entre els dos fenòmens és important de cara al desenvolupament de mesures de protecció i prevenció, ja que el tipus de comportament i d'amenaça que suposen és diferent. La diferència entre un corrent d'arrossegalls i un flux hiperconcentrat rau en la concentració de sediments, sent més elevada en el primer que en el segon.

- *Cota màxima.* La cota màxima és una de les variables més senzilles d'obtenir a partir de simple informació topogràfica. S'observa que els debris flow acostumen a ocórrer en capçalera, que per una banda és on el curs és més violent, i per l'altra és on hi ha més material disponible. La cota també porta implícita la variable vegetació, que no es té en compte en aquest estudi de manera directa però que té una gran rellevància, ja que les arrels contribueixen a fixar el sòl. La relació entre els diferents estadis de vegetació i l'altitud és prou coneguda: a major altitud la vegetació disminueix. L'elevació també pot portar implícita informació sobre la geologia o reflectir certs patrons regionals com passa, per exemple, si l'estructura geològica forma estrats horitzontals (Ayalew et al., 2004). De totes maneres, cal tenir molt en compte que és una variable regional i que per tal d'extreure conclusions encertades l'ordre de magnitud de les elevacions que tractem ha de ser similar. Per dir-ho amb un exemple, no seria adequat comparar altituds del Prepirineu amb altituds dels Alps.
- *Orientació mitjana.* L'orientació és l'angle respecte el nord de la direcció de màxim pendent d'una cel·la. L'orientació mitjana s'ha calculat fent una suma vectorial de les direccions de màxim pendent de totes les cel·les contingudes en la conca. Hi ha certa discrepància sobre la utilitat de l'orientació. Per una banda, hi ha autors que sustenten la importància de l'orientació en els seus estudis, com ara Ayalew et al., (2004) o Lee i Min (2001). Aquests argumenten que la direcció de les tempestes predominants, les diferències en el grau d'insolació, presència de neu, etc., són factors que provoquen que vessants encarats a nord es comportin diferent que vessants encarats a sud, per exemple. D'altra banda, també existeixen estudis (Chi et al.) que, al contrari, no han trobat que hi hagi correlació entre orientació i ocurrència de corrents d'arrossegalls.

Abans de continuar, cal comprovar que les variables escollides no estan correlacionades. En un inici, degut al l'equació de càlcul del Melton ratio (Taula 2) es temia estigués correlacionat amb el pendent mitjà de la conca. Tot i que el seu significat físic és similar, en les dades de la mostra no es corrobora (Figura 17). Per aquest motiu, i donada la importància que se'ls dona a la literatura les dues s'han considerat variables vàlides.

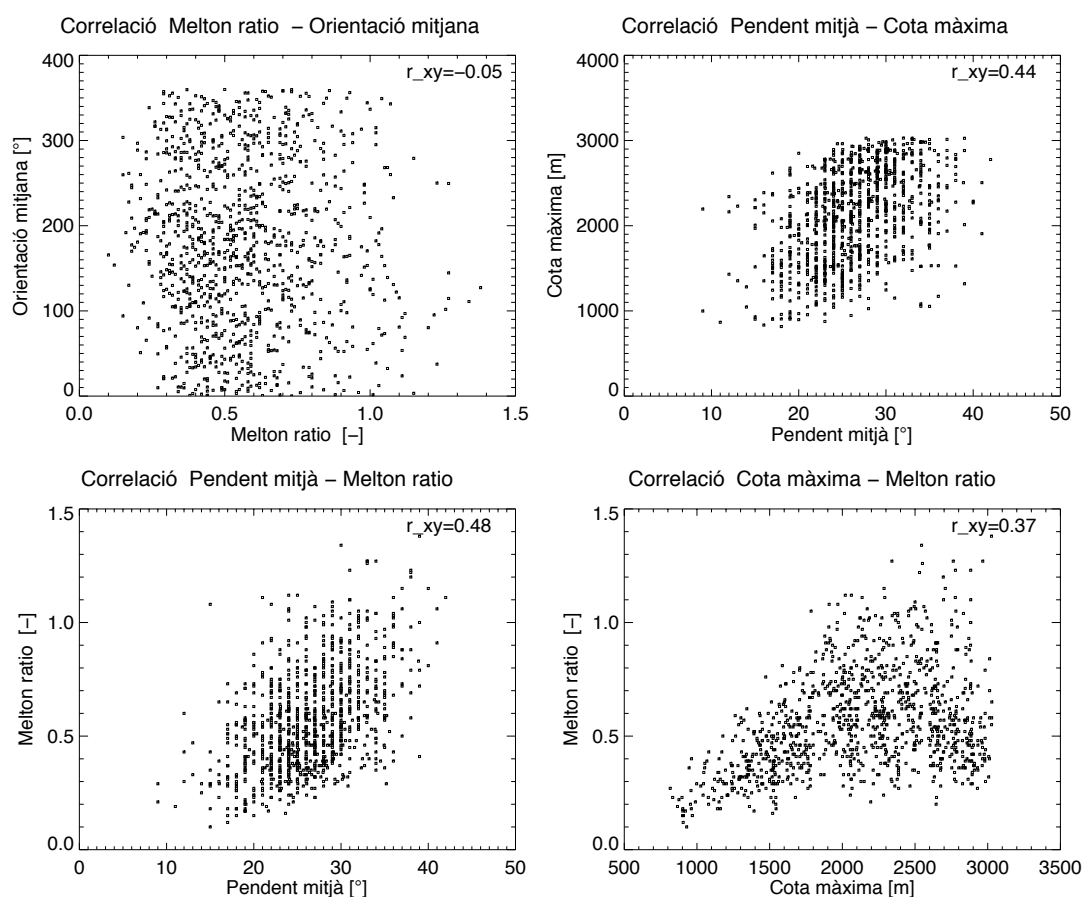


Figura 17. Gràfics de dispersió obtinguts entre algunes de les variables escollides.

Un cop escollides les variables s'han calculat els pesos segons la fórmula (5). D'aquesta manera, com menys àrea de solapament (A_i) té una variable, més pes se li dona. Els pesos resultants es resumeixen a la taula (5).

$$\alpha_i = \frac{(1 - A_i)}{\sum_{i=0}^4 (1 - A_i)} \cdot 0.5 \quad [5]$$

Taula (5). Pesos assignats a cada una de les variables estàtiques. A_i és l'àrea de solapament entre les corbes $P[C_i | x \in \text{reactives}]$ i $P[C_i | x \in \text{no reactives}]$

Variable	Pes (α_i)
Pendent mitjà	0.4
Cota màxima	0.35
Melton ratio	0.15
Orientació mitjana	0.1

6.1.2 Ajust de les funcions de pertinença de les variables estàtiques

Com ja s'ha comentat anteriorment, el disseny de les funcions de pertinença és un dels aspectes més decisius i també controvertits ja que no existeix cap metodologia generalitzada. En aquest cas, s'ha optat per formes lineals a trossos per qüestió de simplicitat. El criteri de disseny s'ha basat fonamentalment en les funcions de distribució de la mostra. De totes maneres, en ocasions aquestes presentaven formes que no permetien extreure'n directament una funció simplificada. Per aquest motiu s'han hagut de modificar considerablement en base a consideracions de la literatura i a criteri expert.

Les funcions de pertinença s'han ajustat prenent com a referència les conques de la mostra detectades com a reactives. Si l'assignació del nivell de susceptibilitat és correcta, les conques on s'ha observat un episodi de corrent d'arrossegalls (conques reactives) haurien d'estar classificades com *molt* o *moderadament* susceptibles. La susceptibilitat es mostra en un mapa de la zona d'estudi on es pinten les subconques de diferent color segons la categoria amb grau de pertinença màxim (Figura 20b). En el cas que hi hagués una pluja uniforme en tot el domini, les conques que reaccionarien amb més facilitat serien les de la categoria *molt susceptible* (vermell).

Per avaluar si l'assignació del nivell de susceptibilitat és encertada, s'ha comptat el nombre d'errors (conques reactives classificades com a *poc susceptibles*), el nombre de falses alarmes (conques no reactives classificades com a *moderadament susceptibles* o *molt susceptibles*) i el nombre d'encerts (conques reactives classificades com a *moderadament susceptibles* o *molt susceptibles*).

El criteri que s'ha utilitzat és el de limitar el nombre d'errors a un 5% del total de conques reactives. Pel que fa a les falses alarmes, s'ha buscat mantenir-les dins d'un marge al voltant del 50% del nombre total de conques, però no s'han intentat minimitzar perquè s'ha considerat que encara que no hagi estat identificat cap corrent d'arrossegalls, no es descarta que en un futur n'hi pugui ocórrer algun. Durant el procés d'ajust s'han fet nombroses versions de les funcions de pertinença, però aquí s'ha optat per referir els trets més significatius de les funcions obtingudes per a cada variable.

6.1.2.1 Pendent mitjà de la conca

Per aquesta variable es presenta el procés seguit per al disseny de les funcions de pertinença, des del disseny d'una proposta inicial a l'establiment de la versió definitiva. Per la resta de variables s'ha fet de manera semblant.

La proposta inicial de funcions de pertinença es basa en les dades de la mostra i en les tendències que es descriuen en la literatura de referència. En el cas del pendent mitjà, tant una com l'altra sostenen que la susceptibilitat augmenta amb el pendent. Per tant, la funció de pertinença a la classe *molt susceptible* hauria de prendre el valor de 0 per valors baixos de pendent i el valor de 1 per valors alts de pendent. Contràriament, la funció de pertinença a la

classe *poc susceptible* hauria de prendre el valor de 1 per a pendents baixos i el valor de 0 per a pendents alts.

Si s'observa la corba de probabilitat condicionada (Figura 15, *esquerra, 1a fila*) s'aprecia que a partir de pendents de 20° comencen a haver conques reactives i a mesura que aquest creix la probabilitat augmenta. La proposta inicial de funció de pertinença per la categoria *molt susceptible* s'ha fet a partir d'aquesta observació, tal com es pot observar en la (Figura 19, *1a fila*). La funció per la categoria *poc susceptible* s'ha pensat similar a la complementària. Per la categoria *susceptibilitat moderada*, era important que garantís una transició entre les dues anteriors. L'objectiu d'aquesta categoria intermèdia és cobrir els casos en que la classificació entre *poc* i *molt susceptible* no és clara. Es tracta d'evitar la indefinició que es crea en el punt on una variable té el mateix grau de pertinença a la categoria *molt susceptible* que a la categoria *poc susceptible*. En aquests casos, el grau de pertinença a la categoria *susceptibilitat moderada* hauria de ser el major.

D'aquesta manera, segons les funcions de pertinença dissenyades inicialment per al pendent mitjà, una subconca que tingui un pendent mitjà de 27°, obtindria segons aquesta variable un grau de pertinença de 0.2 a la classe *poc susceptible*, un grau de pertinença de 0.5 a la classe *moderadament susceptible* i un grau de pertinença de 0.8 a la classe *molt susceptible* (Figura 18).

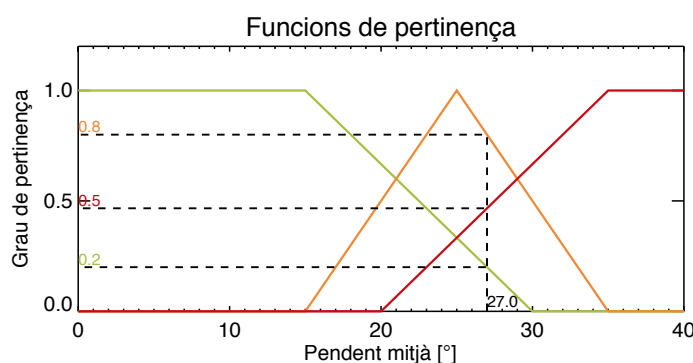


Figura 18. Funció de pertinença corresponent a la versió inicial de la variable estàtica "pendent mitjà" i graus de pertinença a cada categoria per una conca de pendent mitjà= 27°. Color verd: *poc susceptible*; color taronja: *moderadament susceptible*; color vermell: *molt susceptible*.

Després d'unes quantes modificacions a la proposta inicial de funcions de pertinença s'ha aconseguit limitar el nombre d'errors al criteri establert. Les funcions de pertinença definitives es mostren a la Figura 19. Si es comparen els resultats que s'obtenen amb les funcions de pertinença inicials i definitives, mantenint les funcions de pertinença de les altres variables iguals que en la versió definitiva, s'observa que en la versió definitiva el nombre d'errors augmenta lleugerament, però en canvi disminueixen molt les falses alarmes (Figura 20, Taula 6).

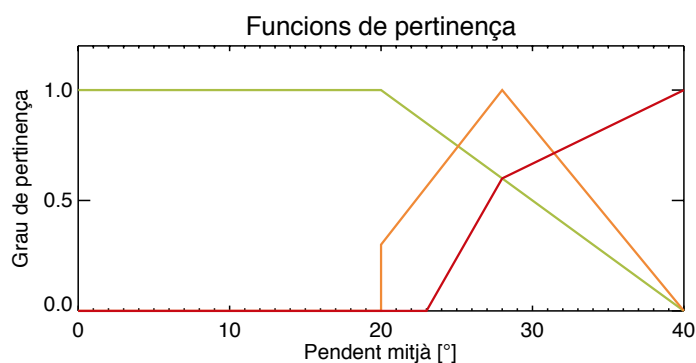


Figura 19. Funcions de pertinença definitives per la variable pendent mitjà. Color verd: *poc susceptible*; color taronja: *moderadament susceptible*; color vermell: *molt susceptible*.

Taula 6 Comparació dels resultats de susceptibilitat entre les versions inicial i definitiva de les funcions de pertinença de la variable pendent mitjà. La segona i quarta columna mostren el nombre d'encerts (conques reactives classificades com a *moderadament susceptibles* o *molt susceptibles*) i falses alarmes (conques no reactives classificades com a *moderadaments susceptibles* o *molt susceptibles*) La tercera i cinquena columna mostren el total d'encerts i falses alarmes. La darrera fila mostra el nombre d'errors (conques reactives classificades com a *poc susceptibles*).

	f. pertinença definitives		f. pertinença pendent mitjà inicial	
	<i>molt/moderadament susceptibles</i>	Total	<i>molt/moderadament susceptibles</i>	Total
Encerts:	20/32	52	26/28	54
Falses alarmes:	142/402	544	205/480	685
Classifcat com:	<i>poc susceptibles</i>		<i>poc susceptibles</i>	
Errors:	3	3	1	1

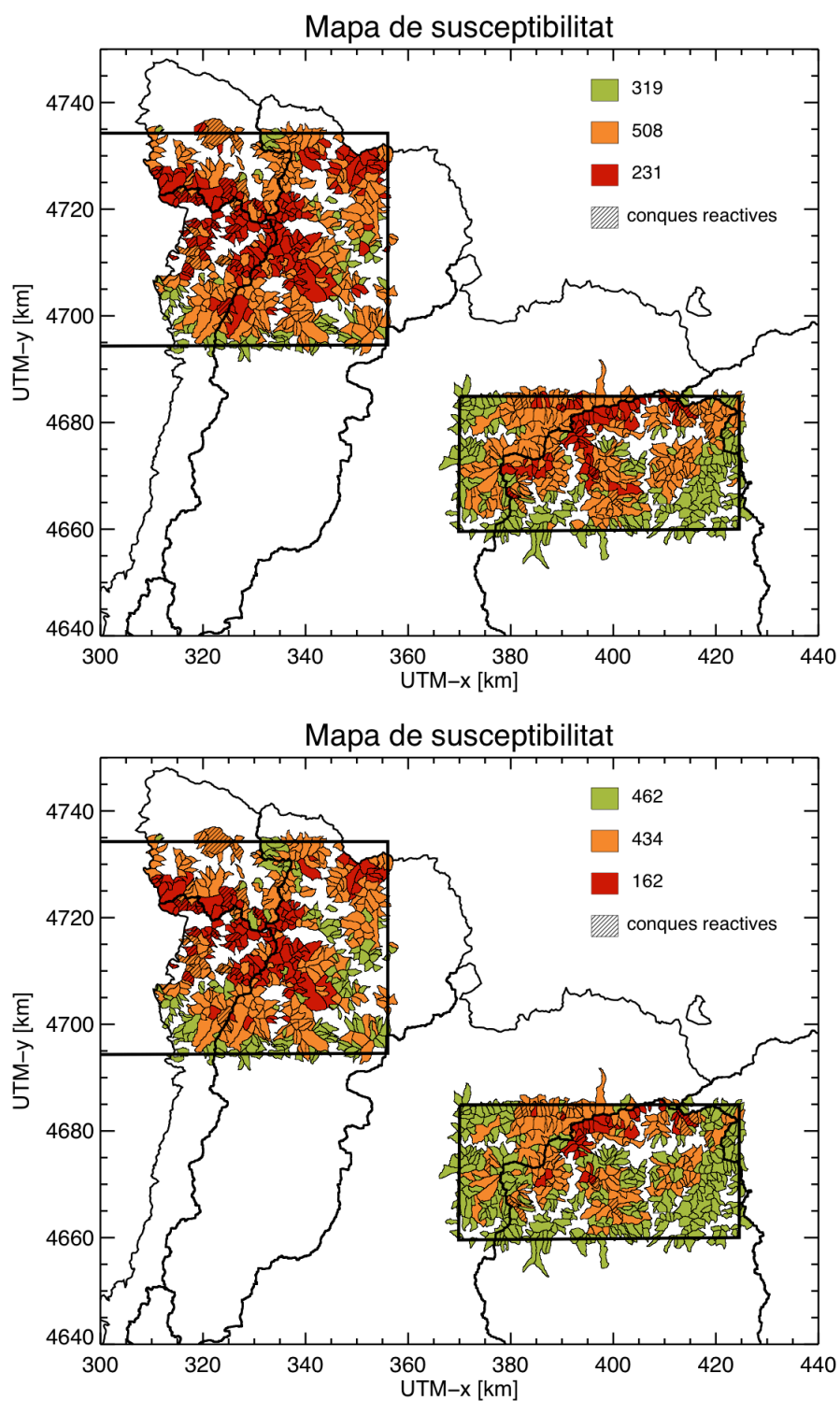
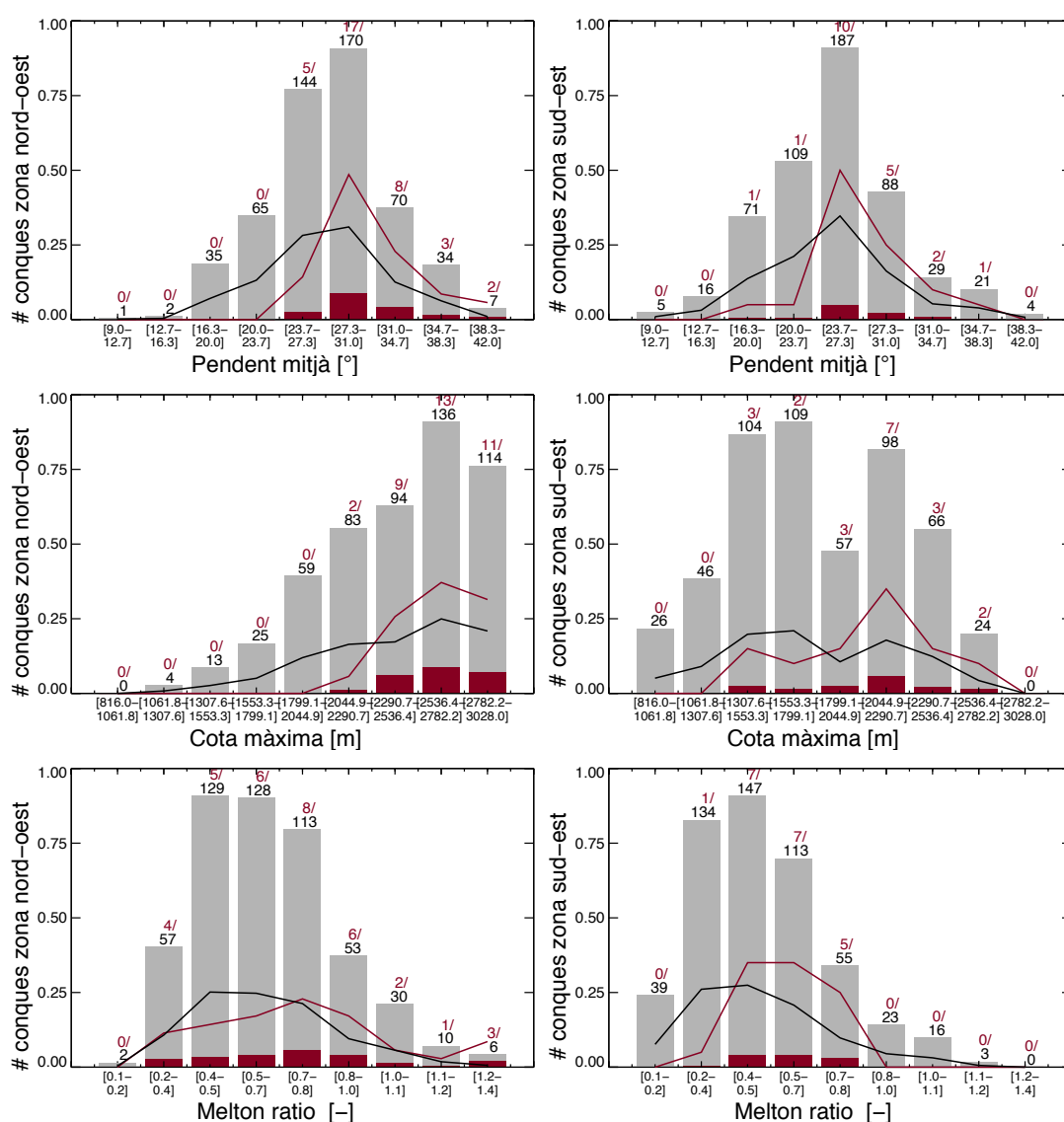


Figura 20. Mapa de susceptibilitat. Color verd: *poc susceptible*; color taronja: *moderadament susceptible*; color vermell: *molt susceptible*. Dalt: versió inicial de les funcions de pertinença del pendent mitjà. Sota: versió definitiva de les funcions de pertinença del pendent mitjà

6.1.2.2 Cota màxima

En ajustar les funcions de pertinença a la cota màxima s'ha observat la diferència de comportament entre els dos subdominis d'estudi. Per aquest motiu s'ha fet una anàlisi més detallada de les distribucions de la mostra repetint els histogrames i les funcions de freqüència però aquest cop separant la mostra en dos segons el subdomini. En efecte, s'ha comprovat que en la zona nord-oest les conques reactives apareixen a partir dels 2000m de cota màxima, mentre que en la zona sud-est les conques reactives a partir dels 1400m (Figura 21, 2a fila) . La resta de les variables, en canvi, no presentaven grans variacions en la seva distribució.



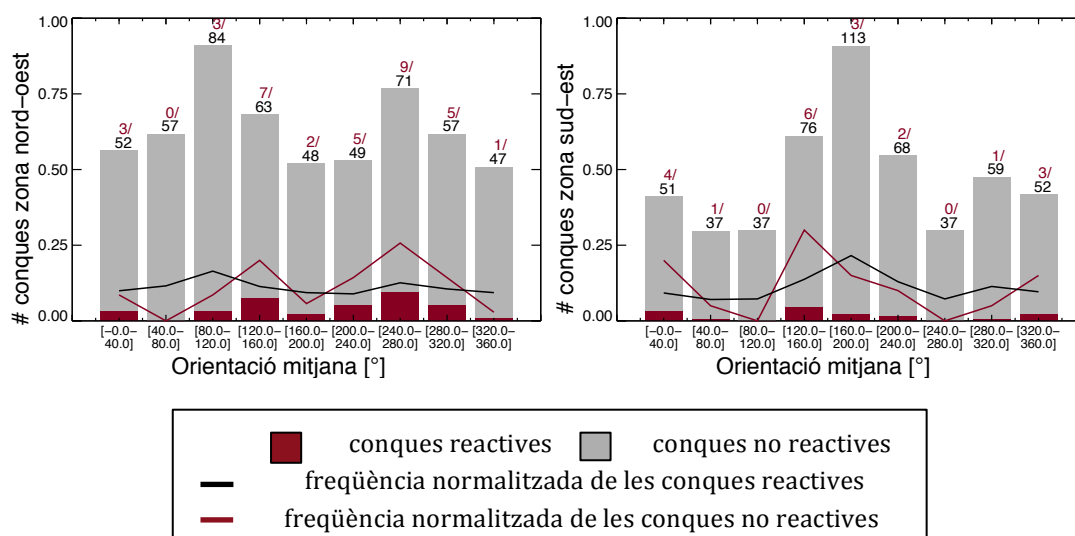


Figura 21. Histograma i probabilitat condicionada a la reactivitat (equació 4). Esquerra: subdomini nord-oest. Dreta: subdomini sud-est. De dalt a baix: pendent mitjà, cota màxima, Melton ratio i orientació mitjana.

La conclusió d'aquest anàlisi ha estat que calia tractar la cota màxima d'una manera diferenciada en els dos subdominis. Per això s'ha definit una nova variable que s'ha anomenat cota màxima relativa amb la intenció de fer comparables els valors dels dos subdominis. Com a cota de referència s'ha pres de manera aproximada la cota en la que apareixen els primers corrents d'arrossegalls en cada subdomini (Figura 23).

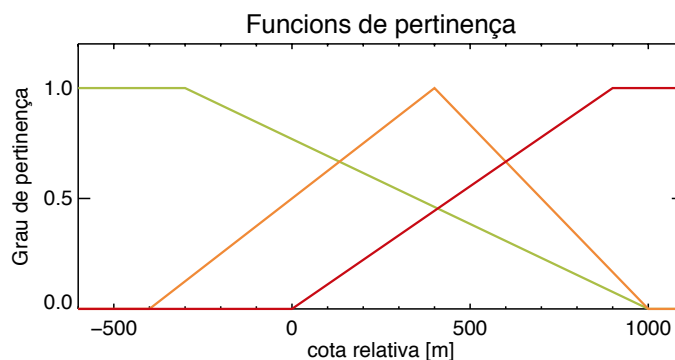


Figura 22 . Funció de pertinença corresponent a la variable estàtica cota relativa. Color verd: *poc susceptible*; color taronja: *moderadament susceptible*; color vermell: *molt susceptible*

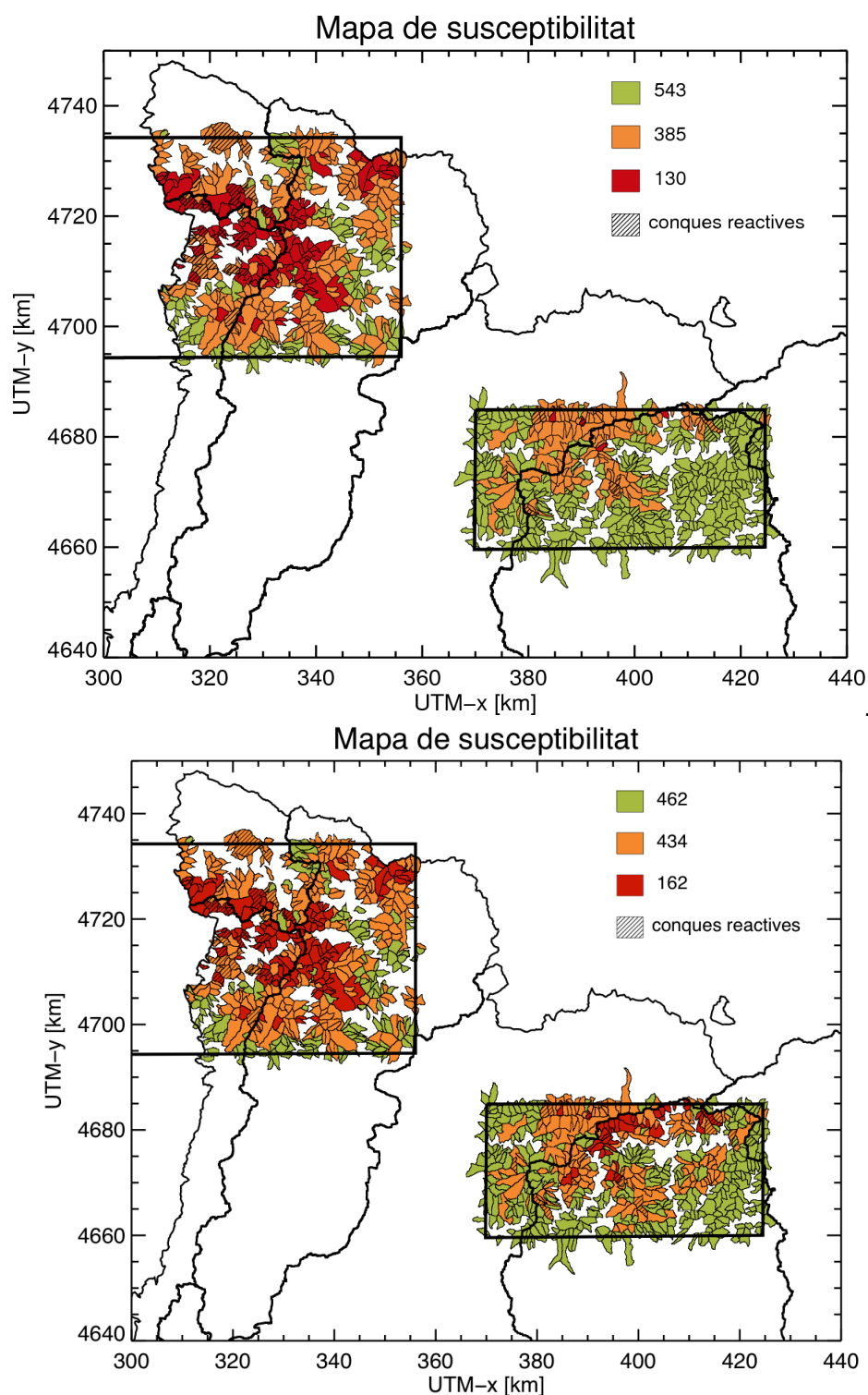


Figura 23 Comparació de mapes de susceptibilitat. Color verd: *poc susceptible*; color taronja: *moderadament susceptible*; color vermell: *molt susceptible*. a) funcions de pertinença uniformes per les dues subzones d'estudi. b) funcions de pertinença 500m desplaçades cap a l'esquerra en la zona sud-est.

Taula 7. Comparació dels resultats de susceptibilitat obtinguts utilitzant la variable cota màxima i cota relativa. La segona i quarta columna mostren el nombre d'encerts (conques reactivs classificades com a *moderadament susceptibles* o *molt susceptibles*) i falses alarmes (conques no reactivs classificades com a *moderadament susceptibles* o *molt susceptibles*) La tercera i cinquena columna mostren el total d'encerts i falses alarmes. La darrera fila mostra el nombre d'errors (conques reactivs classificades com a *poc susceptibles*).

	f. pertinença definitives (amb cota relativa)		f. pertinença amb cota màxima	
Classificat com:	<i>molt/moderadament susceptibles</i>	Total	<i>molt/moderadament susceptibles</i>	Total
Encerts:	20/32	52	18/26	44
Falses alarmes:	142/402	544	112/359	471
Classificat com:	<i>poc susceptibles</i>		<i>poc susceptibles</i>	
Errors:	3	3	11	11

6.1.2.3 Orientació mitjana

Les corbes de probabilitat condicionada per la variable orientació (Figura 15 4a fila, esquerra) mostren clarament dos pics que corresponen a les direccions sud-est i oest. Aquesta tendència es va voler reproduir en les funcions de pertinença. L'explicació d'aquest comportament té a veure amb la direcció de l'eix de la serralada dels Pirineus i la rugositat del relleu en la direcció perpendicular.

Tal com s'ha explicat per al cas del pendent mitjà, s'ha dibuixat la funció de pertinença per a la categoria *moderada* de manera tal que evités que la transició entre la categoria *poc susceptible* i *molt susceptible* fos molt brusca. Si es fa la funció de pertinença a la classe moderada constant i igual a 0, el resultat és que el nombre total d'encerts disminueix de 52 a 50 i el nombre d'errors augmenta de 3 a 5. No obstant, és la variable amb menys pes, de manera que és relativament poc responsable del resultat global.

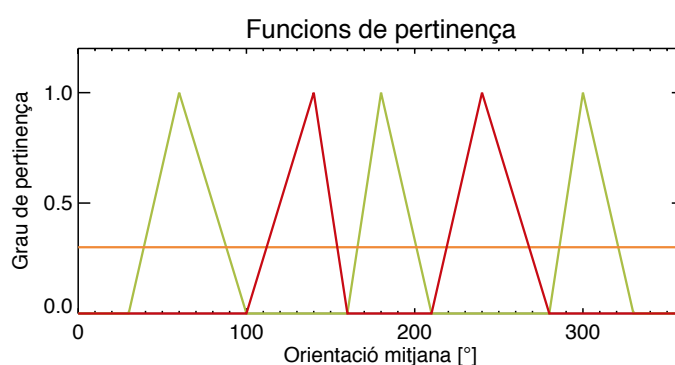


Figura 24. Funció de pertinença corresponent a la variable estàtica orientació mitjana. Color verd: *poc susceptible*; color taronja: *moderadament susceptible*; color vermell: *molt susceptible*.

6.1.2.4 Melton ratio

En el cas del Melton ratio, els intents per dibuixar funcions de pertinença fidels a les corbes de probabilitat condicionada proporcionades per la mostra (Figura 15.3.a) no proporcionaven resultats prou satisfactoris. Segons la literatura de referència, valors majors de Melton ratio denoten una major tendència a reactivitat, però això les dades d'estudi no ho reflecteixen d'una manera clara. Per aquest motiu, un cop definides les funcions per la resta de les variables es va recórrer a optimitzar les funcions de pertinença del Melton ratio a partir de condicionar la forma i deixar tres graus de llibertat: les abscisses dels punts a, b i c de la Figura 25. El criteri d'optimització va ser la combinació que obtingués el major valor de CSI (equació 6) tot forçant que el nombre d'errors fos igual o menor a 3, que correspon al 5% del nombre de conques reactives.

$$CSI = \frac{\text{encerts}}{(\text{encerts} + \text{falses alarmes} + \text{errors})} \quad [6]$$

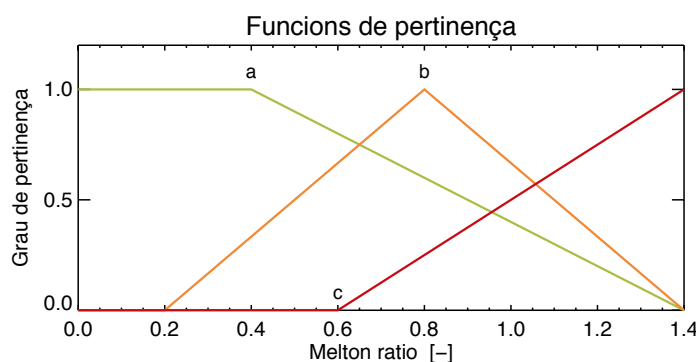


Figura 25. Funció de pertinença corresponent a la variable estàtica Melton ratio. Els paràmetres a, b i c són els que s'han optimitzat trobant els valors de 0.4, 0.4 i 0.8 respectivament. Color verd: *poc susceptible*; color taronja: *moderadament susceptible*; color vermell: *molt susceptible*. Càlcul de les variables dinàmiques: % àrea inestable

6.2 Magnitud de l'episodi de pluja

En aquesta secció es descriu com a partir de l'episodi de pluja es calcula la inestabilitat de la conca. La Figura 26 mostra un esquema d'aquest procés.

En primer lloc, a partir de les dades de pluja acumulada cada 30 minuts proporcionades pel radar es calculen les variables dinàmiques en cada instant de temps: durada(h), intensitat mitjana(mm/h) i pluja antecedent (mm) (1r requadre de la Figura 26). A partir d'aquestes variables es troba el % d'àrea inestable mitjançant les corbes intensitat-durada-pluja antecedent que s'han presentat en la Figura 11 (2n requadre de la Figura 26) Els criteris que s'han seguit per definir aquestes variables es descriuen amb més detall a la secció 6.2.1.

En segon lloc, s'han dissenyat unes funcions de pertinença per a la variable % d'àrea inestable. En funció d'aquestes s'ha atorgat un grau de pertinença a les categories de pluja *feble*, *moderada* i *severa* (3r i 4t requadre de la Figura 26). Els criteris seguits per al disseny de les funcions de pertinença es descriuen a la secció 6.2.2.

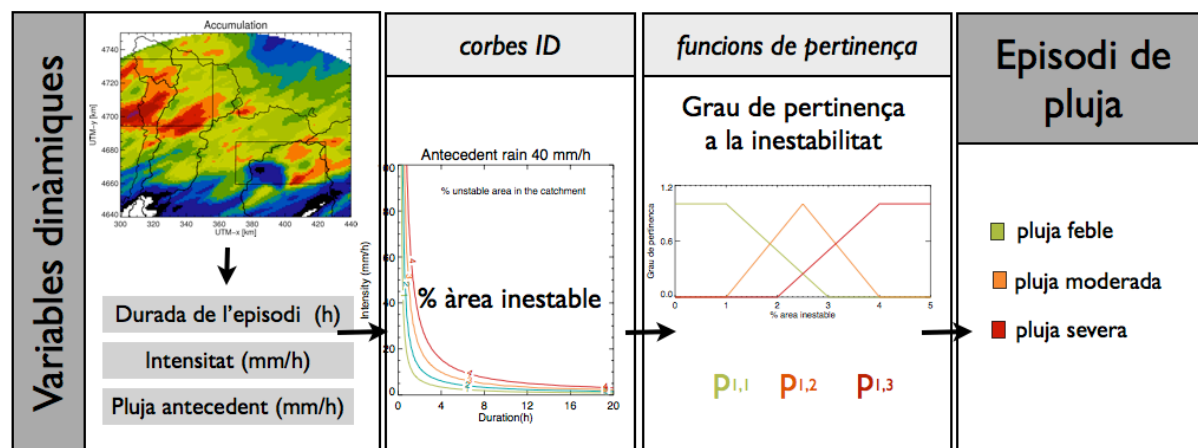


Figura 26. Esquema del càlcul de la magnitud de l'episodi de pluja

6.2.1 Càlcul de les variables dinàmiques: % area inestable

Per tal d'integrar les dades de pluja al classificador, cal definir què s'entén per episodi i per tant com es mesurarà la durada i la intensitat. El començament de l'episodi s'ha definit en el moment en què la intensitat de pluja és diferent de zero. La durada de l'episodi és el temps des del començament de l'episodi. El final de l'episodi s'ha establert com el punt en què deixa de ploure durant més de tres hores. La intensitat mitjana es defineix com la pluja acumulada dividida per la durada de l'episodi en cada instant. Per últim, la pluja antecedent es defineix com la pluja acumulada durant el temps de saturació de la conca.

La pluja antecedent representa de manera implícita les condicions de saturació del sòl. Aquí no es considera el temps de concentració del flux superficial sinó que el temps de saturació (T_s) és el lapse de temps que triga a saturar-se el sòl per efecte del flux subsuperficial, i es pot calcular d'una manera molt aproximada amb l'equació [7] (Bregoli et al., 2011). N representa el número de cel·les de la subconca, θ és el contingut d'aigua de saturació i va ser fixat en 0,4, α és el pendent, K és la conductivitat hidràulica i el quocient a/b representa l'àrea drenada per unitat d'ample de flux.

$$\tau_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{b_i} \cdot \frac{\theta_{s_i}}{K_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \sin \alpha_i} \quad [7]$$

El pendent i l'àrea drenada s'han calculat amb l'ajuda de l'ARCGIS a partir d'un model digital del terreny de 25mx25m de el Instituto Geográfico Nacional. Pel que fa a la permeabilitat, se'n van

assumir valors aproximats a partir d'un mapa geològic de l'Institut de Cartografia de Catalunya a escala 1:250.000 degut a que no hi ha informació sobre el sòl disponible per a la regió d'estudi. El fet d'assumir valors de permeabilitat a partir de la geologia és una suposició molt pobre però com que no es tenia disposició de dades millors es va considerar suficient com per dissenyar el classificador.

A més, les corbes intensitat-durada-pluja antecedent utilitzades són en realitat molt poc sensibles a la pluja antecedent, de manera que errors en el càlcul del temps de saturació no provoquen gairebé canvis en els resultats.

Tenint la sèrie temporal d'intensitat de pluja amb acumulacions cada mitja hora, per a cada pas de temps s'ha calculat la durada i la intensitat d'episodi. Mitjançant les corbes intensitat-durada-pluja antecedent s'ha calculat el % d'àrea inestable de la conca. En aquest punt s'han considerat diferents finestres de temps: s'ha trobat l'àrea inestable corresponent a tenir en compte l'última mitja hora, l'última hora, etc. fins la durada total de l'episodi. De tots aquests valors d'àrea inestable se n'ha agafat el valor màxim, de manera que es cobreixen totes les situacions, tant si és una pluja de llarga durada i baixa intensitat la que produeix la inestabilitat com si és curta i intensa. L'exemple de la Figura 27 mostra un episodi de 3 hores de durada en el que s'ha calculat el % d'àrea inestable corresponent a totes les finestres de temps. En aquest cas, el màxim s'observa quan s'agafen les últimes 1.5 hores de pluja.

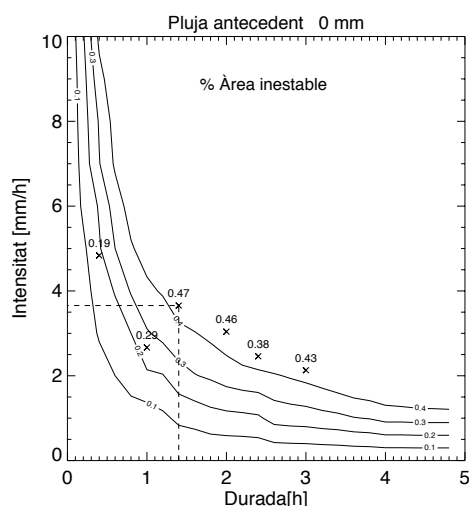


Figura 27 Comparació % àrea inestable considerant totes les finestres de temps d'un episodi de 3 hores. L'àrea inestable màxima és del 0.47% i es dona quan es consideren les últimes 1.5h de pluja.

6.2.2 Funció de pertinença de les variables dinàmiques

Una vegada obtingut el % d'àrea inestable se li ha assignat un grau de pertinença a les diferents categories de pluja. Per això ha calgut novament dissenyar funcions de pertinença. En aquest cas s'ha tingut en compte com a punt de partida les consideracions de Medina i Zappa (2011) on es

proposaven les corbes del 2%, 3% i 4% com a llindars d'amenaça baixa, mitja i alta respectivament.

El disseny de les funcions de pertinença per a la variable dinàmica s'ha dut a terme paral·lelament a la combinació de les variables estàtiques i dinàmiques, ja que les dues coses estan íntimament relacionades en la manera en què s'afecta al resultat final.

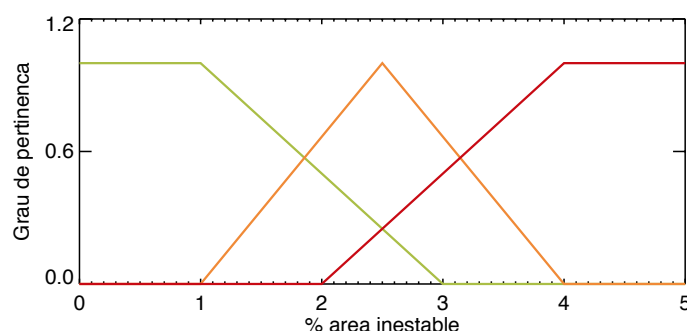


Figura 28. Funcions de pertinença definitives per la variable % d'àrea inestable. Color verd: *pluja feble*; color taronja: *pluja moderada*; color vermell: *pluja severa*

6.3 Classificació: regles, operadors, nivell alerta

En els apartats anteriors s'ha descrit com s'ha trobat el grau de susceptibilitat i la magnitud de l'episodi de pluja. El següent pas és combinar aquestes dues informacions per tal d'establir el grau d'amenaça. La idea bàsica és que per tal que salti una amenaça, s'han de complir dues condicions: que la conca sigui susceptible i que estigui plovent força. L'anàlisi de les diferents alternatives de combinació s'ha fet amb l'episodi pilot del 22-23 de juliol de 2007. La classificació s'executa per a cada pas de temps durant tot l'episodi de manera que les alertes d'amenaça van canviant segons la pluja de cada moment (Figura 29).

Per tal que la combinació de la susceptibilitat amb l'episodi de pluja sigui coherent i doni uns resultats que tinguin sentit en la realitat s'han provat diferents alternatives de combinació. Les primeres alternatives considerades han estat l'ús d'operadors mentre que posteriorment s'ha proposat un sistema de regles que sembla donar millors resultats. A continuació es mostra la informació més rellevant de totes les alternatives provades.

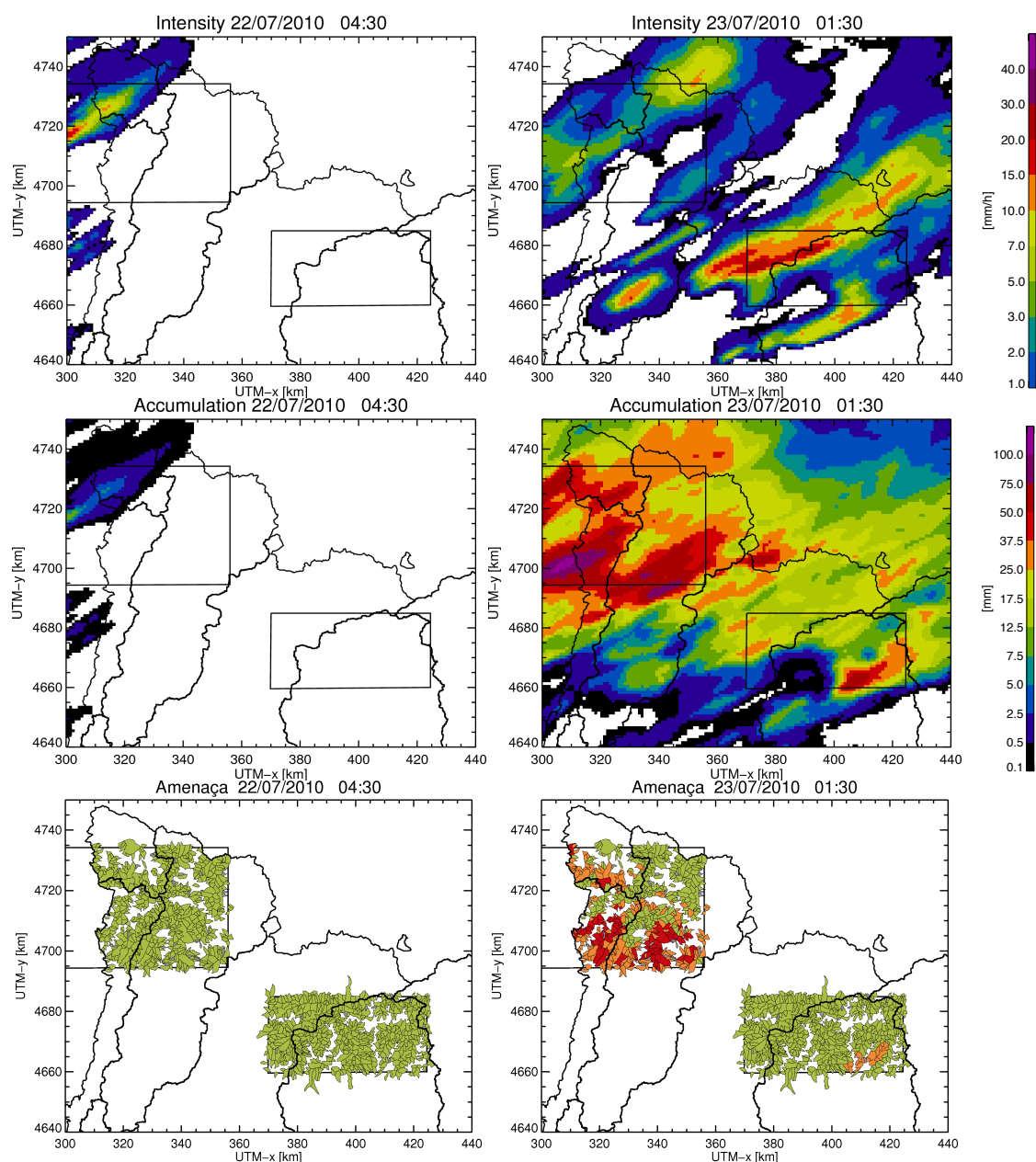


Figura 29. Mapa d'intensitat de pluja, pluja acumulada i amenaça (de dalt a baix) en diferents passos de l'episodi pilot. Esquerra: 01:30, dia 22/07; dreta: 04:30, dia 23/07

6.3.1 Operadors

En primer lloc s'ha considerat la suma ponderada per combinar la pluja amb la susceptibilitat. Això és equivalent a tractar la magnitud de la pluja com una variable més. En el moment de fer la suma ponderada de totes les variables estàtiques s'afegeix el % d'àrea inestable com a cinquena variable donant-li un pes de 0.5 sobre 1. D'aquesta manera, es dóna la mateixa importància a les variables dinàmiques que al conjunt de les variables estàtiques (Equació 8).

$$\mu_j = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^v \alpha_i \mu_{i,j} + 0,5 \cdot \mu_{din,j} \quad [8]$$

on i representa les variables estàtiques, j la categoria i $\mu_{din,j}$ el grau de pertinença a les variables dinàmiques.

Per tal de resumir el comportament al llarg de tot l'episodi pilot s'ha realitzat un mapa que mostra l'amenaça màxima que hi ha hagut a cada conca (Figura 30b). Per veure quin efecte tenen respectivament les variables dinàmiques i les estàtiques sobre el resultat final, s'ha comparat aquest mapa amb l'alerta màxima que hi hagués hagut si només s'haguessin contemplat les variables dinàmiques (Figura 30a) o les estàtiques (Figura 20b). Amb aquesta comparació s'observa que els mapes resultants de la combinació i de considerar només la la pluja s'assemblen considerablement: les zones amb una pluja *severa* de la Figura 30a amb les zones amb una amenaça *alta* de la Figura 30b. Així, es veu que amb aquesta configuració les variables dinàmiques tenen molt de pes en el resultat final.

Per comprovar-ho s'han realitzat mapes considerant un % d'àrea inestable homogeni a tota l'àrea d'estudi. D'aquesta manera es veu quina alerta d'amenaça tindria cada conca si fos exposada a unes determinades condicions de pluja (Figura 31). Efectivament, s'observa que la classificació de les conques és gairebé homogènia per a cada valor de % d'àrea inestable. A més, amb un 3.5% d'àrea inestable hi ha conques que tenen una categoria d'amenaça inferior que amb un 2.5%. Això passa perquè el grau de pertinença a la categoria pluja *moderada* disminueix molt en passar del 2.5% al 3.5% d'àrea inestable, de manera que a les conques amb un grau de pertinença molt alt a la categoria *poc susceptible*, la categoria *amença moderada* guanya per un 2.5% d'àrea inestable gràcies a les variables dinàmiques, però no per un 3.5% d'àrea inestable. Aquest comportament no passaria a la realitat, i per tant s'hauria d'evitar.

Per tal que el sistema sigui més representatiu de la realitat seria desitjable que per un mateix % d'àrea inestable la classificació final no sigui tan homogènia i el classificador tingui més en compte la susceptibilitat.

Per altra banda, amb aquest mètode de combinació es dona el cas d'algunes conques on la pluja es classificaria com a *feble*, és a dir, no hi està plovent gaire o gens, i en canvi la classificació final és d'amenaça moderada o alta. Aquest comportament no és desitjable ja que fa disparar el nombre de falses alarmes.

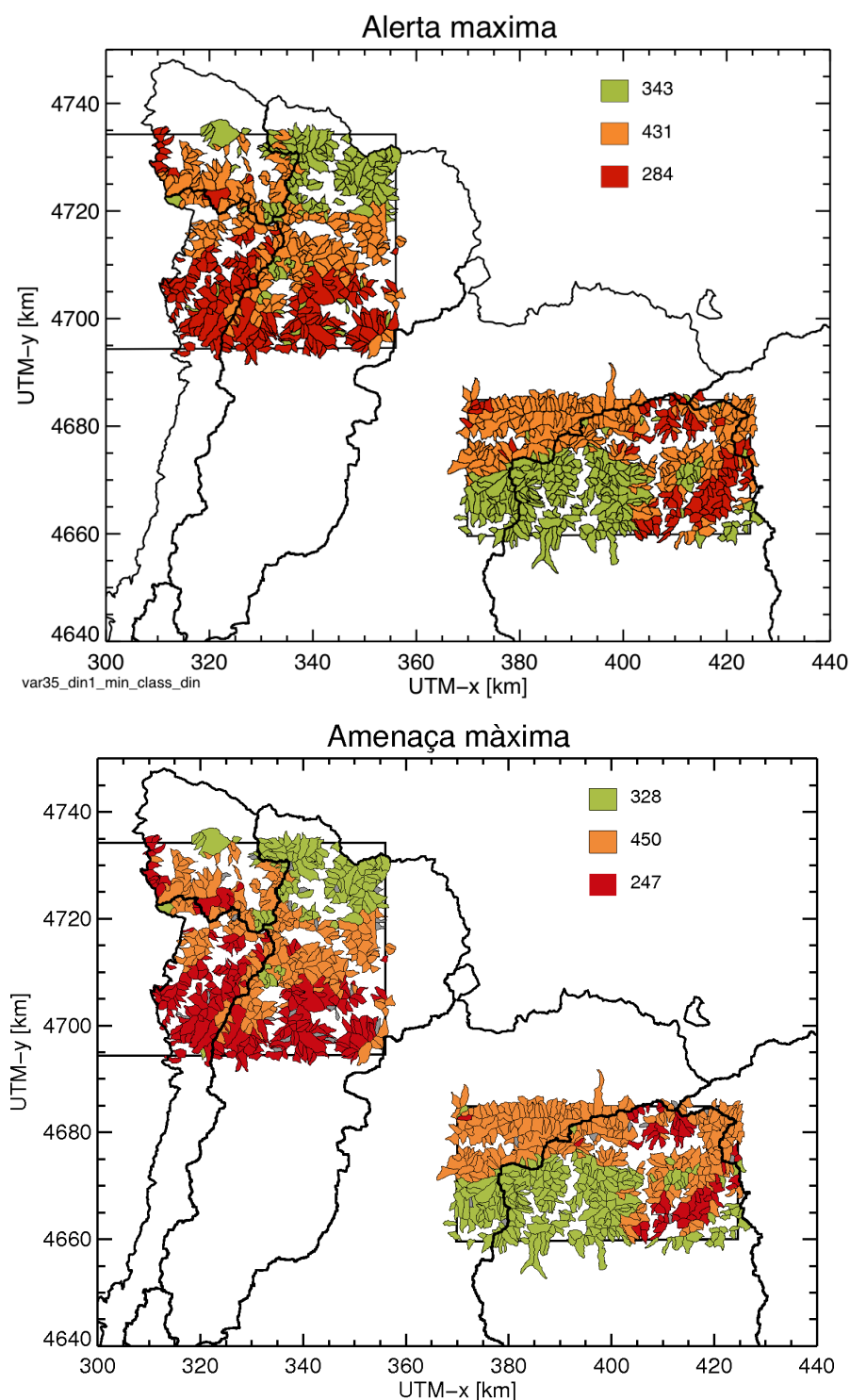


Figura 30. Mapes de l'alerta màxima en cada conca durant l'episodi pilot. color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*. Els números de la llegenda indiquen el nombre de conques classificades a cada categoria. Dalt: només variables dinàmiques. Sota: combinació amb pes del 50%

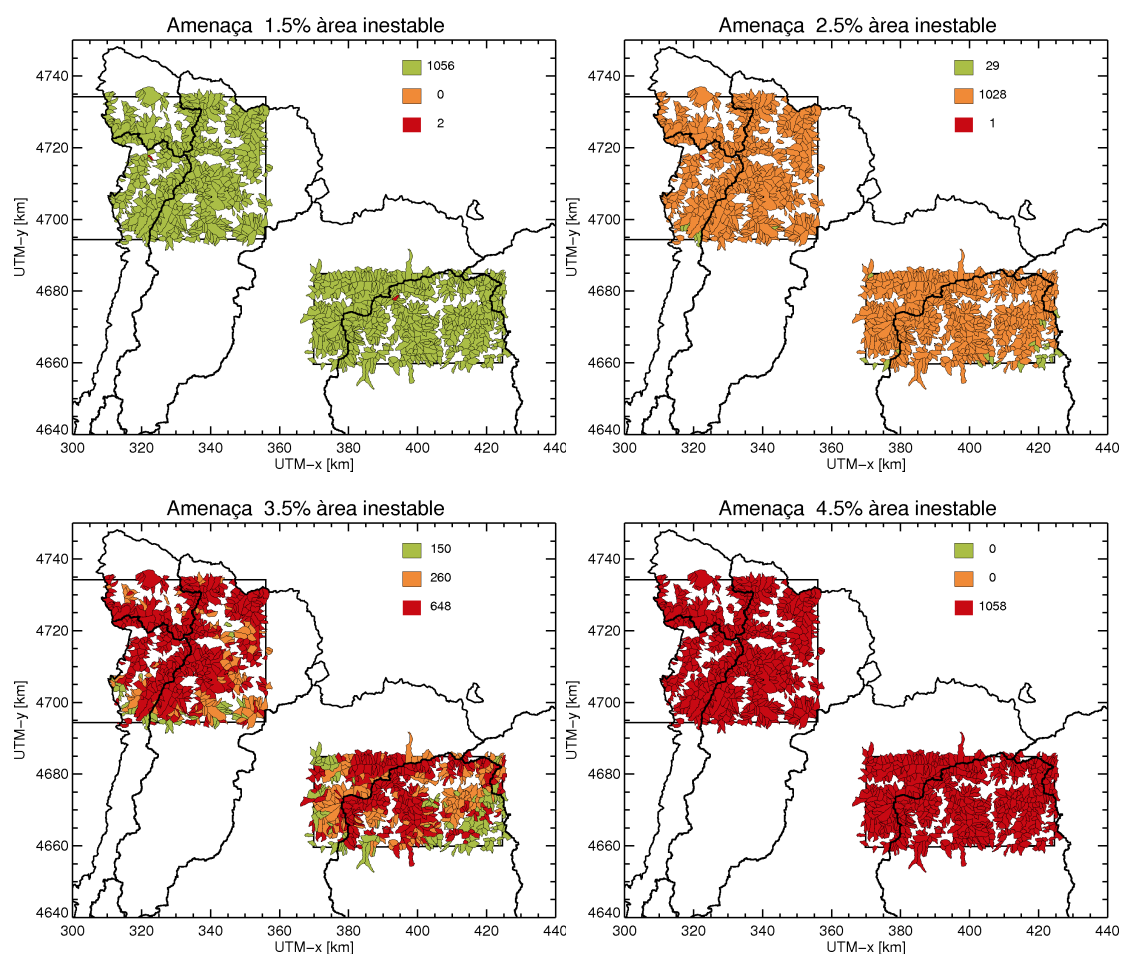


Figura 31. Mapes amb condicions de pluja homogènies i combinació amb pes del 50%. Color verd: *amenaçà baixa*; color taronja *amenaçà moderada*; color vermell: *amenaçà alta*. Els números de la llegenda indiquen el nombre de conques classificades a cada categoria. D'esquerra a dreta i de dalt a baix: 1.5%, 2.5%, 3.5% i 4.5% d'àrea inestable.

Per tal d'equilibrar la influència que tenen respectivament la susceptibilitat i la pluja al resultat final s'ha provat de donar pesos diferents a cadascuna. El resultat, però, continua sense ser satisfactori perquè no s'aconsegueix una interacció: sempre predomina més una o l'altra.

Aquesta interacció s'aconsegueix, per exemple, si s'agafa la categoria mínima entre la que s'obtingria tenint només en compte la susceptibilitat o tenint només en compte la pluja. Aquest mètode de combinació es pot considerar com una intersecció en sentit estricte, ja que per tal que a una conca se li assigni la categoria *amenaçà alta*, s'hauria de classificar com a *molt susceptible* i pluja *severa*. D'aquesta manera els resultats són més realistes, ja que s'assegura que les alarmes no salten si no plou, alhora que les alertes no depenen tant de la pluja.

De totes maneres, aquest mètode de combinació no treu partit de la naturalesa difusa del classificador, ja que és necessària la classificació prèvia en una categoria definida de susceptibilitat i pluja. Aquesta classificació prèvia pot donar lloc a errors, com per exemple, en el cas d'una conca que tingui un grau de pertinença a la categoria *poc susceptible* més gran que a les altres categories però amb poca diferència. Això significa que la classificació de la conca en

categories de susceptibilitat estrictes és ambigua. No obstant, en aquest cas, sempre se li assignaria la categoria *amença baixa*, independentment de la pluja.

Després d'altres proves amb diferents operadors difusos definits a la literatura de referència, s'ha vist que calia canviar el plantejament si es volia obtenir la resposta esperada del classificador. En la secció següent es descriu el sistema de regles que s'ha utilitzat finalment.

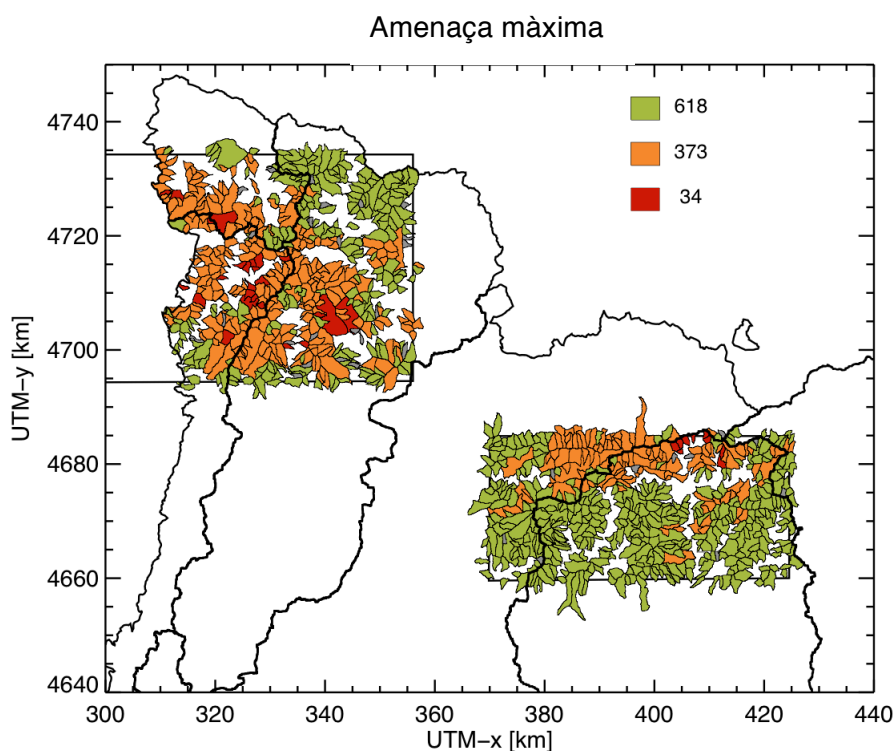


Figura 32. Mapes d'amença màxima per al mètode de combinació intersecció, és a dir, categoria mínima entre la que s'obté tenint només en compte la susceptibilitat o tenint només en compte la pluja. Color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*. Els números de la llegenda indiquen el nombre de conques classificades a cada categoria.

6.3.2 Regles

Per tal de superar les limitacions dels procediments anteriors, es va dissenyar un sistema de regles. Aquestes reflecteixen el comportament esperat i tenen l'avantatge de mantenir l'esperit "difús" del sistema. Si es classifiqués a priori en categories de susceptibilitat i de magnitud de l'episodi de pluja, no es tindria en compte l'ambigüitat que es pot donar en el límit entre categories. En canvi, en un sistema de regles difús no cal determinar una categoria única de susceptibilitat i de pluja per a la conca, sinó que es conviu amb la incertesa fins al final.

De la mateixa manera com es faria una taula de veritat amb variables binàries, s'elabora una taula que descriu el comportament esperat i de la qual se'n desprenen les regles (Taula 8):

- Si (pluja feble i poc susceptible) o (pluja feble i moderadament susceptible) o (pluja feble i molt susceptible) o (pluja moderada i poc susceptible) llavors l'amenaça serà baixa.
- Si (pluja moderada i moderadament susceptible) o (pluja moderada i molt susceptible) o (pluja severa i poc susceptible) llavors l'amenaça serà moderada.
- Si (pluja severa i moderadament susceptible) o (pluja severa i molt susceptible) llavors l'amenaça serà alta.

Taula 8. Regles de combinació de les variables dinàmiques i estàtiques

	Poc susceptible (S_1)	Moderadament susceptible (S_2)	Molt susceptible (S_3)
Pluja feble (I_1)	Amenaça baixa (A_1)	Amenaça baixa (A_1)	Amenaça baixa (A_1)
Pluja moderada (I_2)	Amenaça baixa (A_1)	Amenaça moderada (A_2)	Amenaça moderada (A_2)
Pluja severa (I_3)	Amenaça moderada (A_2)	Amenaça alta (A_3)	Amenaça alta (A_3)

Aquestes regles traduïdes al llenguatge lògic, queden en les expressions de l'Equació 9, on A_1, A_2 i A_3 corresponen a les categories d'*amença baixa*, *moderada* i *alta* respectivament; S_1, S_2 i S_3 corresponen a les categories de *poc susceptible*, *moderadament susceptible* i *molt susceptible* respectivament; I_1, I_2 i I_3 corresponen a les categories de *pluja feble*, *moderada* i *severa* respectivament; \wedge representa l'operador intersecció i \vee l'operador unió.

- si $[(x_{din} \in I_1) \wedge (x_{est} \in S_1)] \vee [(x_{din} \in I_1) \wedge (x_{est} \in S_2)]$
 $\vee [(x_{din} \in I_1) \wedge (x_{est} \in S_3)] \vee [(x_{din} \in I_2) \wedge (x_{est} \in S_1)] \Rightarrow A_1$
- si $[(v_{din} \in I_2) \wedge (v_{est} \in S_2)] \vee [(v_{din} \in I_2) \wedge (v_{est} \in S_3)]$ [9]
 $\vee [(v_{din} \in I_3) \wedge (v_{est} \in S_1)] \Rightarrow A_2$
- si $[(v_{din} \in I_3) \wedge (v_{est} \in S_2)] \vee [(v_{din} \in I_3) \wedge (v_{est} \in S_3)] \Rightarrow A_3$

En lògica booleana, el terme $v_x \in I_1$ prendria els valors de 0 o 1. En lògica difusa, el terme $v_x \in I_1$ s'avalua amb el grau de pertinença de la conca a la categoria I_i . En operar cada expressió, s'obté un valor que s'interpreta com el grau de validesa de la regla, és a dir, un valor que mesura en quin grau és certa la premissa antecedent de la implicació. Com a operadors s'han aplicat les parelles d'operadors mínim-màxim i producte-suma algebraica per a la intersecció-unió, que són els operadors que es fan servir de manera més habitual en lògica difusa i s'han descrit en l'apartat 5.3.

En el cas que s'utilitzi l'operador mínim per la intersecció i l'operador màxim per la unió, les regles quedarien de la següent manera, on v_i representa el grau de validesa de la regla i:

- $v_1 = \max [\min[\mu_{din,1}, \mu_{est,1}], \min[\mu_{din,1}, \mu_{est,2}], \min[\mu_{din,1}, \mu_{est,3}], \min[\mu_{din,2}, \mu_{est,1}]]$
- $v_2 = \max [\min[\mu_{din,2}, \mu_{est,2}], \min[\mu_{din,2}, \mu_{est,3}], \min[\mu_{din,3}, \mu_{est,1}]]$
- $v_3 = \max [\min[\mu_{din,3}, \mu_{est,2}], \min[\mu_{din,3}, \mu_{est,3}]]$

L'assignació final d'una determinada categoria d'amenaça vindrà determinada per la regla que obtingui un grau de validesa major (Equació 10)

$$A = \operatorname{argmax} [v_1, v_2, v_3] \quad [10]$$

Donats els resultats de les dues parelles d'operadors s'observa que en els dos casos soluciona els problemes que presentaven les combinacions anteriors: una conca no reacciona si no plou, i una conca poc susceptible pot tenir un nivell moderat d'amenaça si les condicions de pluja són molt adverses.

Per poder veure com actua el classificador, s'han construït les taules 9a i 9b. Cada casella de la taula està dividida en tres colors representant les categories d'amenaça *baixa*, *moderada* i *alta* (A_1, A_2 i A_3). En cada color hi ha el nombre de conques classificades com a tals, segons el grau de susceptibilitat i magnitud de l'episodi de pluja que tenen. Els totals de la columna esquerra representen el total de conques que es classificarien com a pluja *febles*, *moderada* i *severa* respectivament si només es tinguessin en compte les variables dinàmiques. Els totals de l'última fila representen els totals de conques que es classificarien com a *poc susceptibles*, *moderadament susceptibles* i *molt susceptibles* si només es tinguessin en compte les variables estàtiques. La suma total és 1025 i no 1048 com el nombre total de conques, perquè en 33 conques no es disposava d'informació de pluja.

Taula 9a. Resultat de l'execució utilitzant els operadors mínim i màxim. Els colors representen les categories d'amenaça *baixa*, *moderada* i *alta*. En cada color hi ha el nombre de conques classificades com a tals, segons el grau de susceptibilitat i magnitud de l'episodi de pluja. Els totals de la columna esquerra representen el total de conques que es classificarien com a pluja *febles*, *moderada* i *severa* respectivament si només es tinguessin en compte les variables dinàmiques. Els totals de l'última fila representen els totals de conques que es classificarien com a *poc susceptibles*, *moderadament susceptibles* i *molt susceptibles* si només es tinguessin en compte les variables estàtiques. La suma total és 1025 i no 1048 com el nombre total de conques, perquè en 33 conques no es disposava d'informació de pluja.

	Poc susceptible			Moderadament susceptible			Molt susceptible			Total
Pluja feble	136	0	0	145	0	0	29	0	0	310
Pluja moderada	155	0	0	7	172	0	2	95	0	431
Pluja severa	0	153	0	0	1	96	0	0	34	284
Total	444			421			160			1025

Taula 9b. Resultat de l'execució utilitzant els operadors producte i suma algebraica

	Poc susceptible			Moderadament susceptible			Molt susceptible			Total
Pluja feble	136	0	0	145	0	0	29	0	0	310
Pluja moderada	91	64	0	70	109	0	28	69	0	431
Pluja severa	0	143	10	0	14	83	0	5	29	284
Total	444			421			160			1025

A partir d'aquestes taules es pot apreciar com en el cas d'utilitzar els operadors mínim-màxim, el resultat és gairebé idèntic al que sortiria fent una classificació prèvia en categories de susceptibilitat i pluja i aplicant les regles com una classificació binària. Dins de cada casella de la taula, el valor major amb molta diferència és el corresponent a la regla de la casella. Per exemple, de les 179 conques que es classificarien com a *moderadament susceptibles* i *pluja moderada*, 172 conques reben la categoria de *amença moderada* i només 7 conques la d'*amença baixa*.

Utilitzant els operadors producte-suma algebraica, en canvi, sí que s'aprecia l'efecte de considerar els graus de pertinença a les diferents categories fins al final, ja que en cada casella de la taula els totals estan més repartits entre les tres categories d'*amença*.

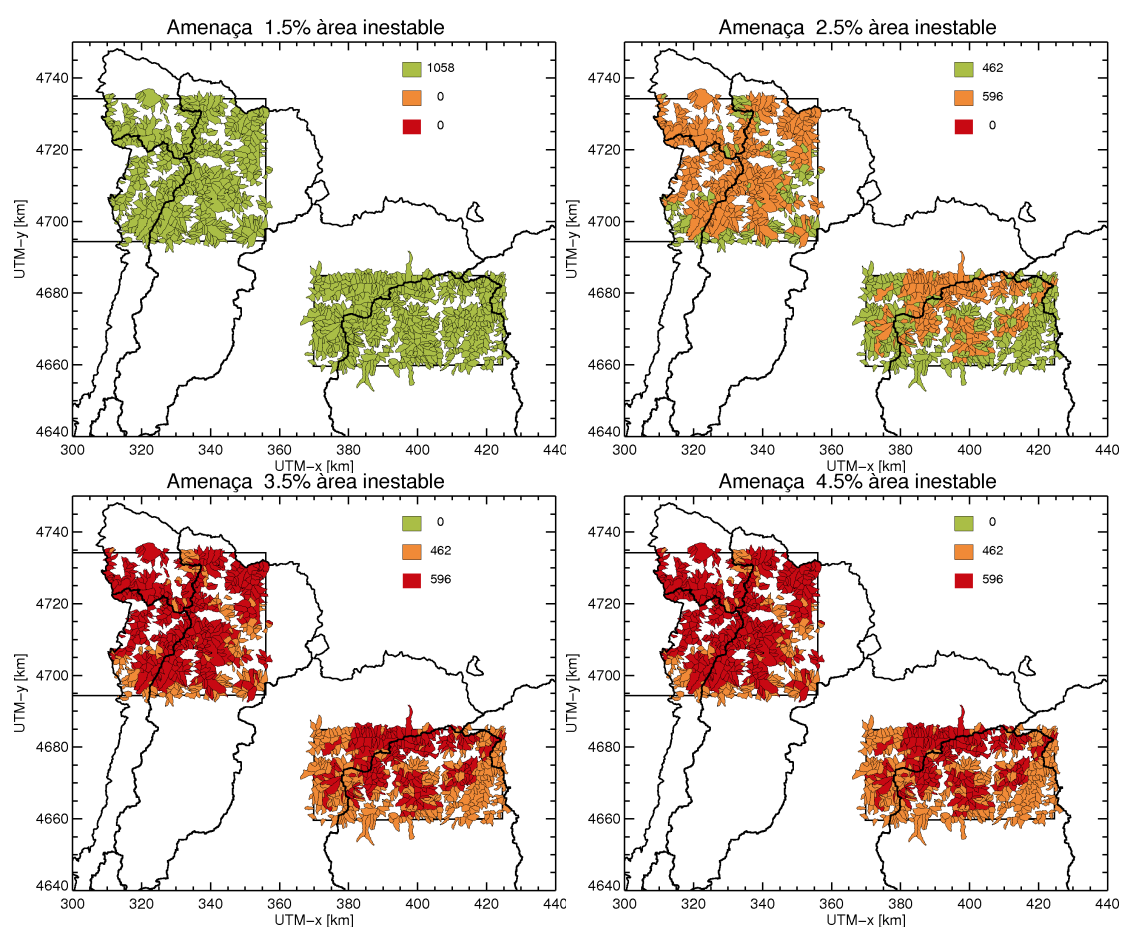


Figura 33. Mapes amb condicions de pluja homogènies i combinació amb els operadors mínim i màxim. Color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*. Els números de la llegenda indiquen el

nombre de conques classificades a cada categoria. D'esquerra a dreta i de dalt a baix: 1.5%, 2.5%, 3.5% i 4.5% d'àrea inestable.

Les figures 33 i 34 mostren l'amenaça considerant el mateix valor de % d'àrea inestable per a totes les conques, que és una manera de veure com reaccionaria cada conca davant d'unes mateixes condicions de pluja. A diferència del que s'observava quan s'utilitzava la suma ponderada com a mètode de combinació (Figura 31), ara l'amenaça no és homogènia en totes les conques per a cada valor de % d'àrea inestable, sinó que la susceptibilitat de la conca interfereix a l'hora de determinar la categoria d'amenaça.

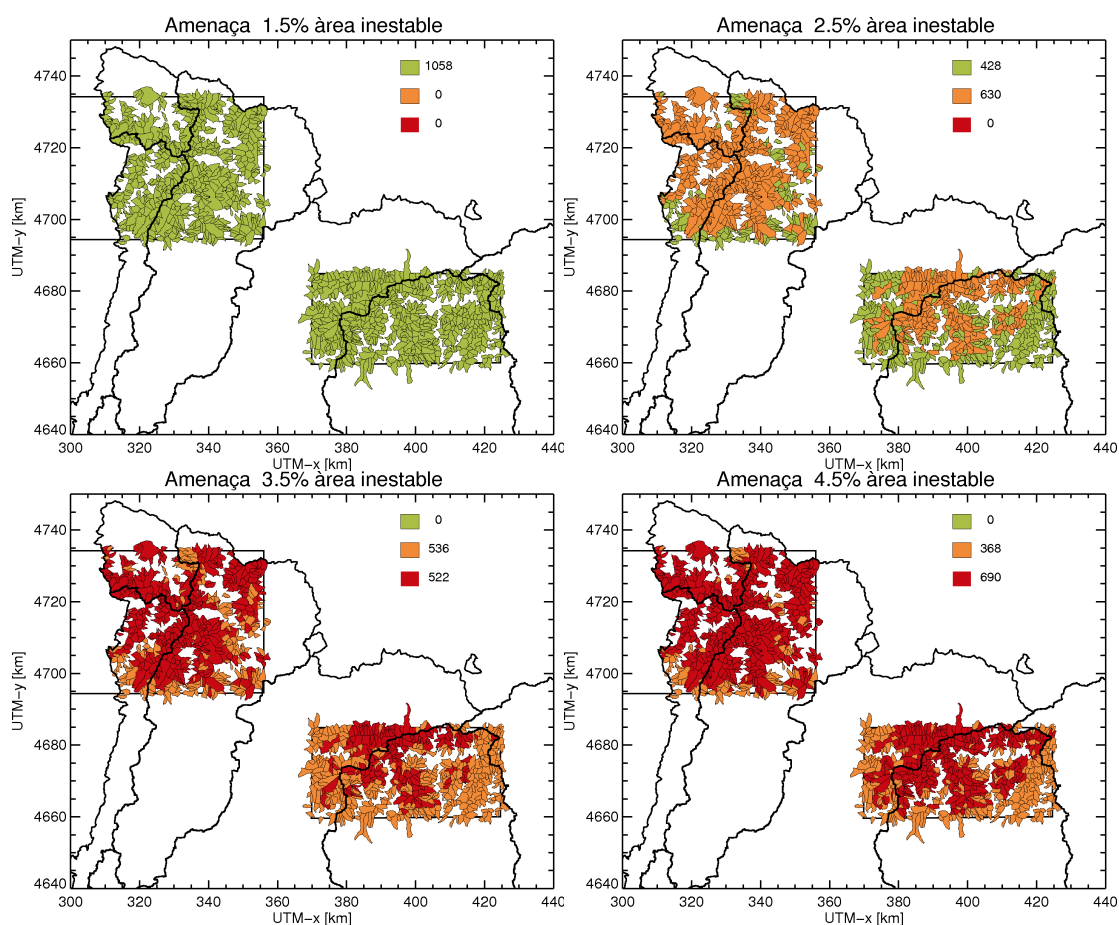


Figura 34. Mapes amb condicions de pluja homogènies i combinació amb els operadors producte i suma algebraica. Color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*. Els números de la llegenda indiquen el nombre de conques classificades a cada categoria. D'esquerra a dreta i de dalt a baix: 1.5%, 2.5%, 3.5% i 4.5% d'àrea inestable.

Les Figures 36 i 35 mostren el mapa d'amenaçes màximes en l'episodi pilot que s'obtidrien utilitzant en el sistema de regles els operadors mínim-màxim i producte-suma algebraica respectivament. Aquests s'han comparat amb mapa que s'obtidria considerant només les variables estàtiques (Figura 20b) i el que s'obtidria considerant només les variables dinàmiques (Figura 30). En els dos casos s'observa que el resultat és fruit d'una interacció. Es

veu molt clar en les conques *poc susceptibles* on la pluja és *alta* (s'hi ha registrat una pluja molt intensa o una gran acumulació), que presenten una amenaça *moderada*.

Si es compara el total de conques classificades en cada categoria d'amenaça mitjançant les dues parelles d'operadors, no s'observen diferències substancials. En el cas d'haver utilitzat els operadors producte i suma algebraica, el nombre de conques amb amenaça *baixa* és lleugerament superior, mentre que el nombre de conques amb amenaça *moderada* i *alta* són lleugerament inferiors respecte els resultats d'haver utilitzat els operadors mínim i màxim.

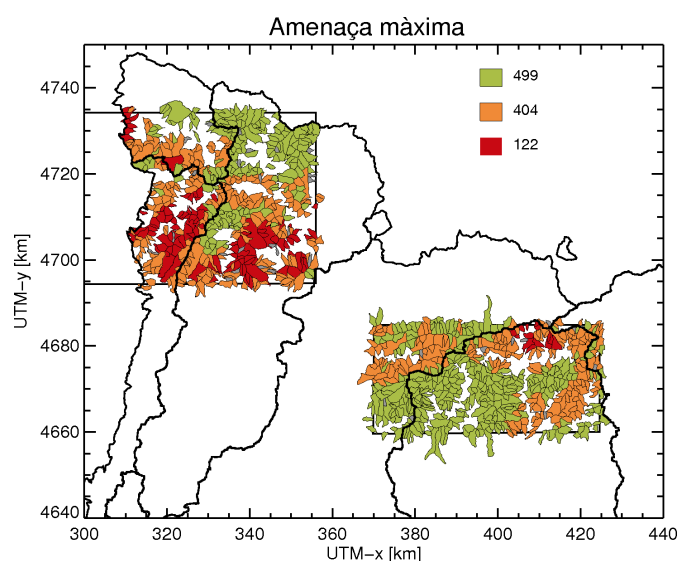


Figura 35. Mapa d'amenaça màxima en l'episodi pilot utilitzant els operadors producte i suma algebraica. Color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*. Els números de la llegenda indiquen el nombre de conques classificades a cada categoria.

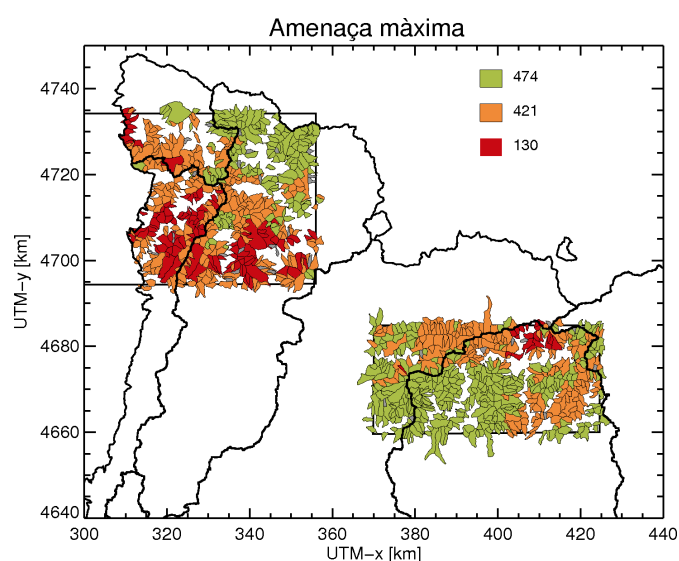


Figura 36. Mapa d'amenaça màxima en l'episodi pilot utilitzant els operadors mínim i màxim. Color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*. Els números de la llegenda indiquen el nombre de conques classificades a cada categoria.

6.4 Discussió d'alguns elements del classificador

En aquest capítol s'ha exposat el disseny del classificador. A tall de resum final, els punts elementals es poden esquematitzar en:

- Entrades del sistema. Hi ha dos tipus de variables d'entrada: per una banda les característiques geomorfològiques de la conca (variables estàtiques) i per l'altra les condicions de pluja a cada pas de temps (variables dinàmiques).
- Sortides intermèdies. A partir de les variables d'entrada es determina la susceptibilitat de la conca, mentre que a partir de les variables dinàmiques es determina la severitat de l'episodi de pluja.
- Sortida final. Amenaça en cada pas de temps a cada conca, resultat de combinar la susceptibilitat de la conca i la magnitud de l'episodi de pluja a cada pas de temps.

Al llarg del procediment, però, s'han estat assumint una sèrie d'hipòtesis de partida que fins ara no s'han comentat explícitament. En primer lloc, s'ha considerat que l'únic agent desencadenant de corrents d'arrossegalls és la pluja. Altres factors com els moviments sísmics poden ser també un factor desencadenant, però com que l'àrea d'estudi no es troba en zona sísmica, no es considera greu negligir-lo. Per contra, l'efecte de la neu i el desgel sí que mereixeria certa atenció, però s'escapa de l'abast d'aquesta tesina. Tenir en compte els efectes de la neu tindria dues grans implicacions. Pel que fa a les dades de radar, se n'hauria de fer una interpretació diferent, ja que ara no es distingeix la pluja de la neu. Per l'altre costat, el model físic a partir del qual s'ha calculat el % d'àrea inestable s'hauria de reajustar per incorporar un nou model d'acumulació i infiltració.

En segon lloc, s'ha assumit que tots els corrents d'arrossegalls estan originats per esllavissades, considerant que en són la causa més freqüent (Iverson et al., 1997). No obstant, els corrents d'arrossegalls es poden originar també a partir d'altres processos, com per exemple si es forma al llarg del canal a mesura que s'incorpora sediment al flux (*in-channel debris flow*). Portilla et al. (2010) en reporten alguns en aquesta zona dels Pirineus.

A més, la distinció entre esllavissades i corrents d'arrossegalls no és del tot clara en aquesta tesina, ja que el classificador utilitza les corbes ID fetes a partir d'un model físic que prediu la inestabilitat del terreny, sense considerar si posteriorment es produeix efectivament corrent d'arrossegalls o no.

Per altra banda, el disseny del classificador en si porta a fer una sèrie de reflexions. Per començar, s'ha constatat que la cota màxima és una variable regional. En aquest cas s'ha optat per establir una cota relativa més o menys aproximada de manera que les dues subzones d'estudi fossin comparables. No obstant, caldria definir un concepte més acurat de cota relativa per poder usar aquesta variable amb més rigor.

També s'ha comprovat que l'ajust de les funcions de pertinença no és gens trivial, ja que és difícil predir les conseqüències sobre el conjunt que té l'alteració d'una d'elles. Si es baixa el valor de la funció de pertinença a la categoria *moderada*, per exemple, augmentarà el nombre total de conques classificades en les altres categories, però és molt difícil saber a priori si augmentaran més les conques classificades en la categoria *baixa/feble* o *alta/severa*. En el cas de les variables estàtiques, a més, cal tenir en compte que el grau de pertinença a les diferents categories de susceptibilitat prové de la suma ponderada de totes les variables (Equació 2).

3.1. A més, no cal oblidar que la categoria que es visualitza en el mapa de susceptibilitat és la que té el grau de pertinença màxim, però per a la posterior combinació amb les variables dinàmiques tenen importància els graus de pertinença a totes les categories de susceptibilitat.

Un aspecte particularment rellevant de les funcions de pertinença és la mesura en què se sobreposen entre elles. Per exemple, en el cas de les funcions de pertinença del % d'àrea inestable, les categories feble i severa es creuen quan tenen valors molt baixos. Això fa que en aquest rang predomini de forma molt marcada la categoria moderada. En els resultats s'aprecia perquè el nombre de conques classificades amb amenaça moderada és força elevat (Figures 36 i 35). Si es volgués disminuir el nombre d'alertes d'amenaça moderada, s'haurien de modificar les funcions de pertinença de manera que la diferència entre categories en el rang central de la variable no fos tan gran.

El sistema de regles ha estat l'únic sistema de combinació que ha funcionat, ja que era l'únic que permetia la interacció entre les variables intermèdies. Les alternatives donaven sempre massa pes a una d'elles i comportaments indesitjats. Pel que fa a l'ús dels operadors mínim i màxim o producte-suma algebraica per la intersecció i la unió respectivament, finalment s'ha optat per la segona opció a l'hora d'implementar el sistema ja que amb el mínim-màxim s'obtenen uns resultats molt similars als que s'obtidrien amb regles no difuses. Amb l'ús dels operadors producte i suma algebraica, en canvi, la classificació no està tant predeterminada.

CAPÍTOL 7

APLICACIÓ AL PERÍODE DE MAIG A OCTUBRE DE 2010

7.1 Introducció

En el capítol anterior s'han exposat el disseny i l'estructura del classificador. Per tal de comprovar el seu funcionament, s'ha aplicat al període de maig a octubre de 2010. S'ha escollit un període d'estiu per evitar l'efecte de les nevades, que a l'hivern són freqüents a la zona d'estudi.

Tal i com s'ha fet amb l'episodi de referència mencionat en el capítol anterior, s'han pres dades de pluja acumulada cada mitja hora. Com a mètode de combinació de la susceptibilitat i la pluja s'ha utilitzat el sistema de regles definit en la secció 6.3.2 utilitzant els operadors difusos producte i suma algebraica.

En aquest capítol es presenta en primer lloc una anàlisi del període global dels sis mesos. A continuació es tracten els mesos per separat per tal de detectar on i quan el sistema desenvolupat ha produït les alertes. Per últim s'estudien cinc episodis seleccionats amb més detall i s'analitza el comportament d'algunes conques en concret.

7.2 Període de maig a octubre de 2010

Per començar, s'ha fet una anàlisi dels resultats obtinguts en el període de maig a octubre de 2010. Pel que fa a la pluja, al final del període s'observen acumulacions que van des dels 175 mm a més de 500 mm en algunes zones (Figura 37). D'altra banda, establint l'amenaça màxima que s'ha registrat a cada conca (Figura 38), es comprova que més d'un 50% de les conques han tingut alguna alerta al llarg dels sis mesos.

Tot i que es tracta d'un estiu plujós, a primer cop d'ull podria semblar que el nombre d'alertes és excessiu. Per això cal veure quantes vegades s'han disparat aquestes alertes, per determinar si han estat degudes a un episodi puntual o han estat recurrents. Les Figures 39 i 40 mostren en cada conca el nombre de dies en els que ha saltat com a mínim una alerta moderada o alta respectivament. Per comptabilitzar-ho no s'han tingut en compte els episodis de pluja sinó els dies naturals, de manera que si un episodi dura més d'un dia, s'ha comptat com a dos dies. Tot i que aquest fet és discutible, s'ha considerat que no alterava la interpretació dels resultats.

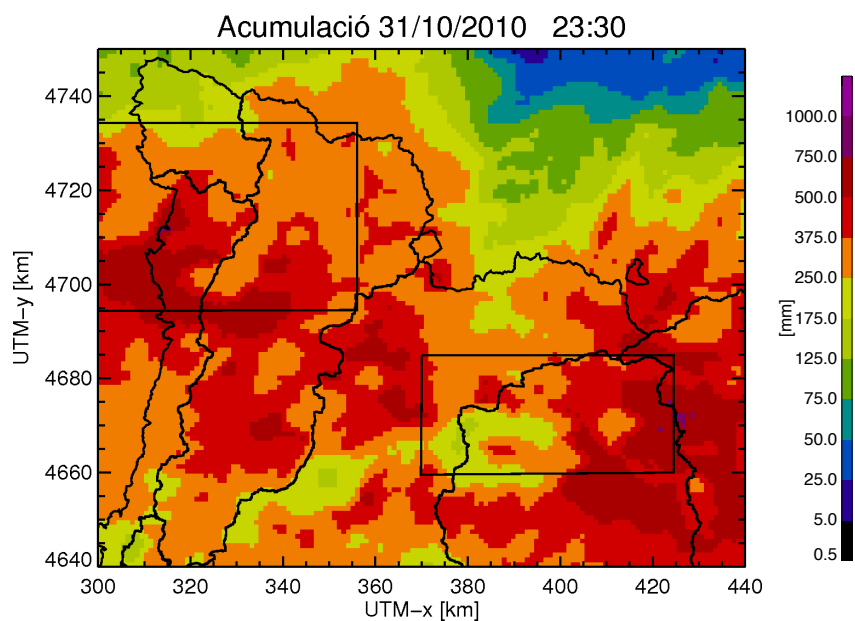


Figura 37. Mapa de pluja acumulada de maig a octubre de 2010.

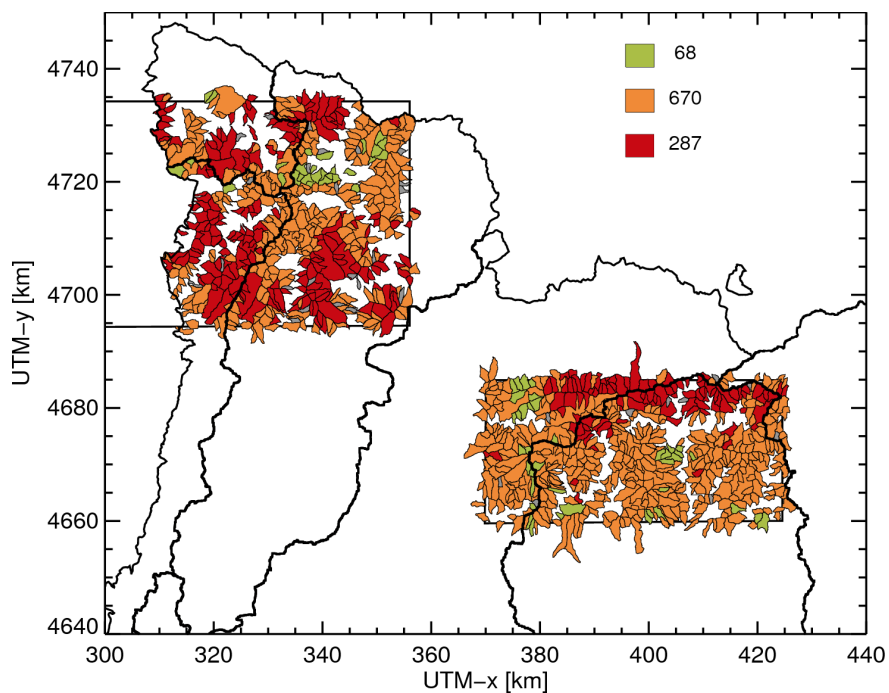


Figura 38. Mapa de l'amenaça màxima registrada durant el període de maig a octubre de 2010.

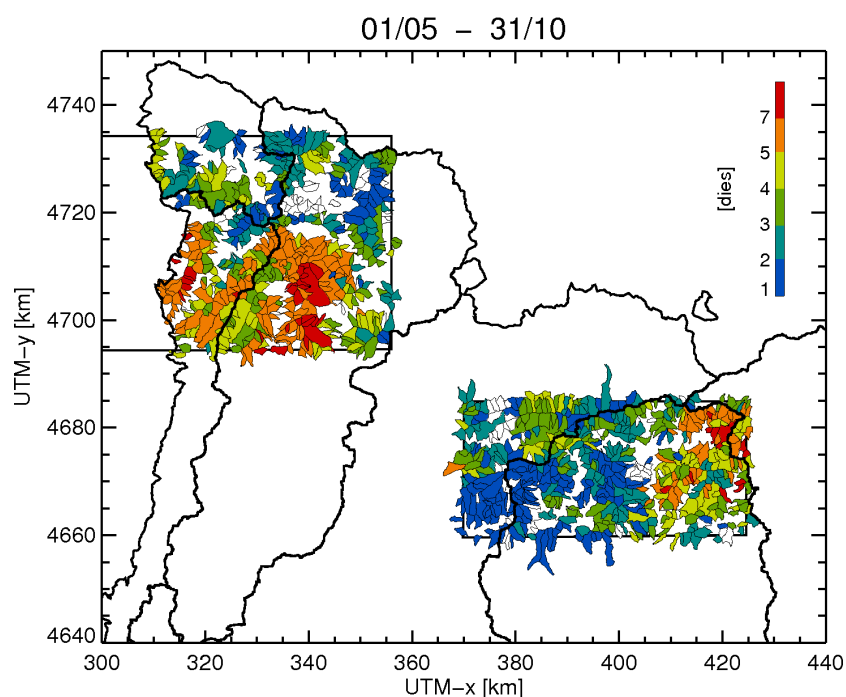


Figura 39. Mapa de la zona d'estudi que mostra el nombre de dies en què s'ha observat una amenaça moderada en el període de maig a octubre de 2010.

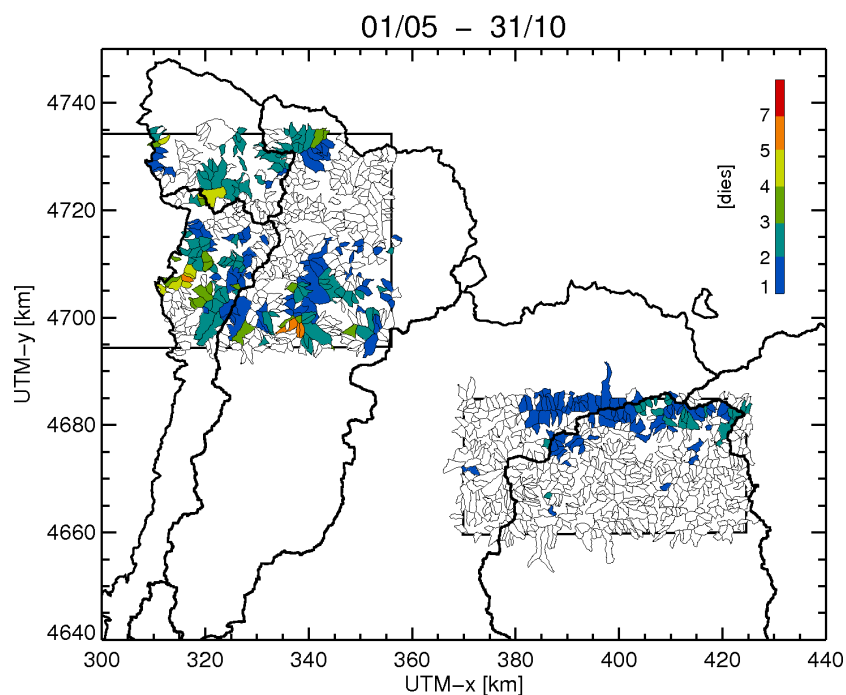


Figura 40. Mapa de la zona d'estudi que mostra el nombre de dies en què s'ha observat una amenaça alta en el període de maig a octubre de 2010.

Els mapes de les Figures 39 i 40 aporten molta informació, ja que permeten veure que les alertes produïdes a les conques del domini són singulars: l'alerta d'amenaça moderada s'ha obtingut per una mateixa conca com a molt per 7 dies, i en el cas de les alertes d'amenaça alta, en la majoria d'ocasions el total és d'una o dues alertes. A més, s'ha de tenir en compte que en un mateix

episodi de pluja, és natural que si en una conca es presenta una alerta d'amenaça alta se'n presenti també una de moderada.

Resulta interessant comparar aquests mapes amb els mapes de susceptibilitat (Figura 20, *sota*) i el mapa de pluja acumulada (Figura 37) ja que es poden apreciar relació amb tots dos. Si es compara amb el mapa de susceptibilitat es comprova que, com era d'esperar, les conques amb més amenaces tenen en la majoria dels casos una susceptibilitat alta. Alhora, també s'observa que les zones amb més acumulació de pluja registren un nombre d'amenaques més elevat.

A continuació es presenta una anàlisi més detallada pels mesos de juny, juliol i octubre, ja que són els mesos en què es registren o bé majors acumulacions de pluja o bé més alertes.

- Juny de 2010

El juny de 2010 és el mes de tot el període estudiat que presenta acumulacions més altes de manera generalitzada. En gran part de l'àrea d'estudi es superen els 75 mm i en alguns punts s'arriben a superar els 150 mm (Figura 41). Malgrat tot, els mapes que descriuen el nombre d'alertes a cada conca (Figures 42 i 43) indiquen que el nombre total d'alertes és relativament baix, especialment en el cas de l'amenaça alta.

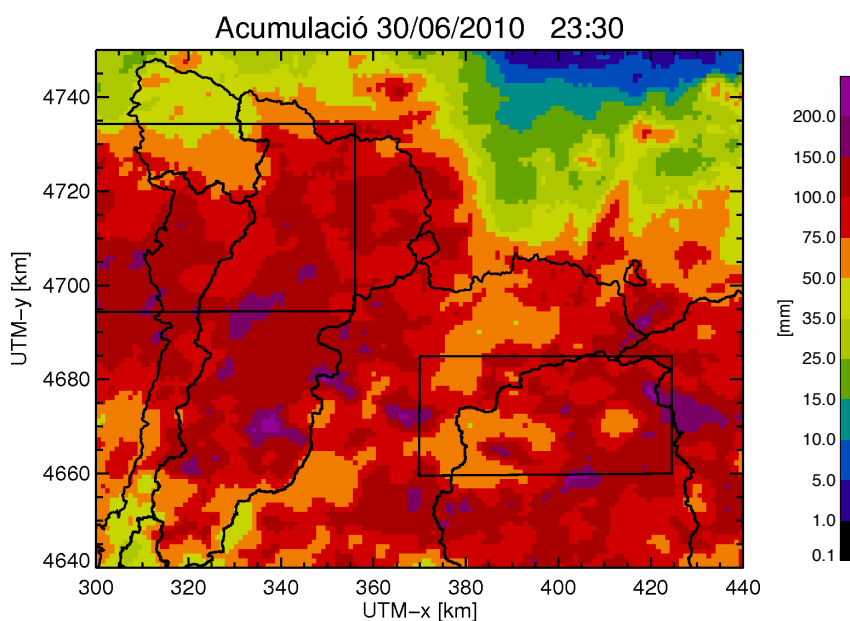


Figura 41. Mapa de pluja acumulada de 1 a 30 de juny de 2010.

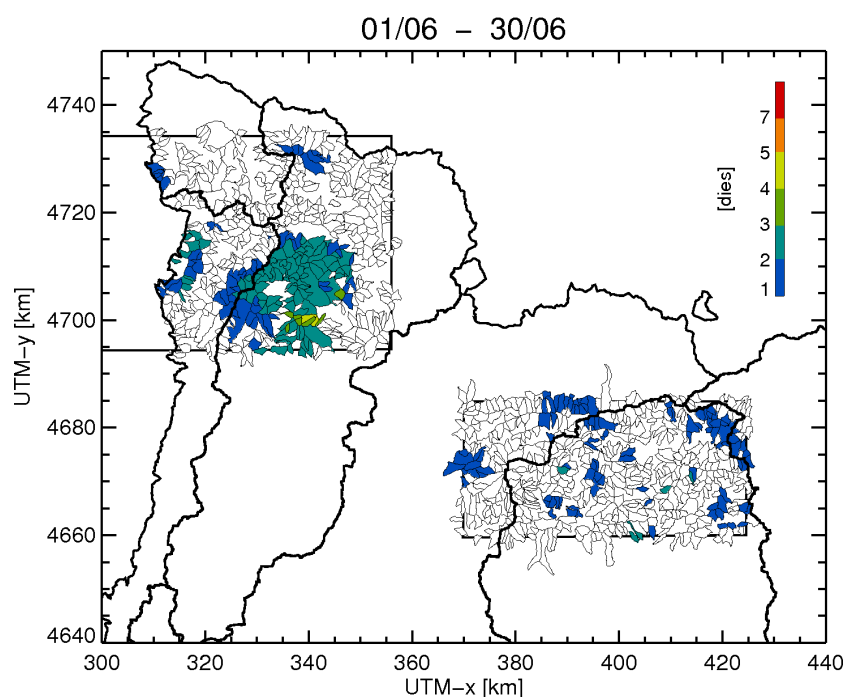


Figura 42. Mapa de la zona d'estudi que mostra el nombre de dies en què s'ha observat una amenaça *moderada* durant el mes de juny de 2010.

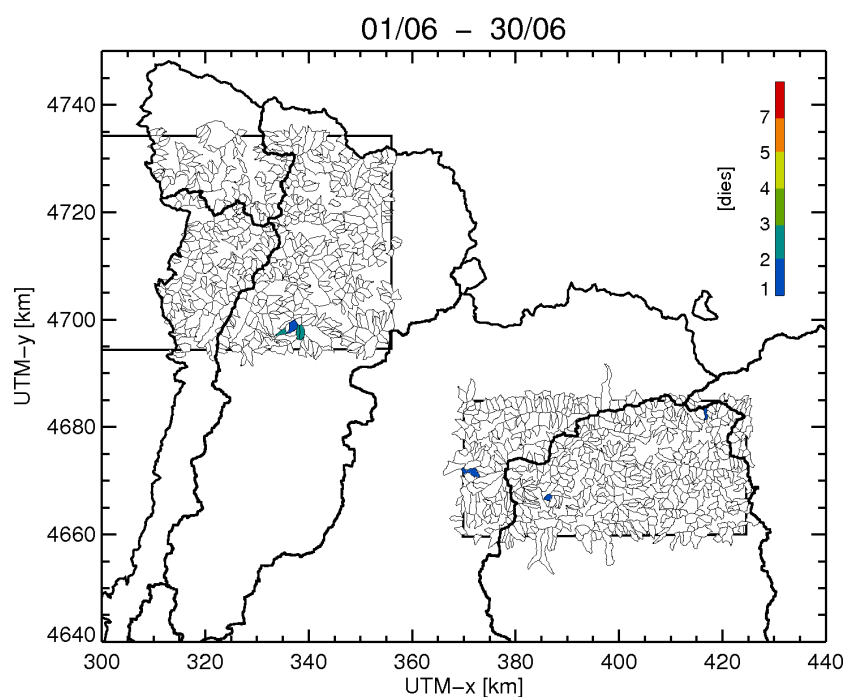


Figura 43. Mapa de la zona d'estudi que mostra el nombre de dies en què s'ha observat una amenaça *alta* durant el mes de juny de 2010.

A part del nombre d'alertes, però, interessa saber quan han succeït, si han estat molt repartides en el temps, o han estat episodis concrets que les han provocat. La Figura 44 mostra una sèrie temporal en la que apareix per a cada pas de temps el nombre d'alertes d'amenaça moderada i

alta respectivament juntament amb la pluja d'aquell moment. Per representar la pluja s'han sobreposat les intensitats de pluja de totes les conques. El gràfic mostra com tot i haver episodis amb intensitats molt elevades, no sempre han provocat gaires alertes, com en els dies 6, 13, 27 i 28 de juny. L'episodi que registra més alertes va del 8 al 10 de juny. Tot i que no correspon a les intensitats més altes del mes, és l'episodi que presenta una durada més llarga.

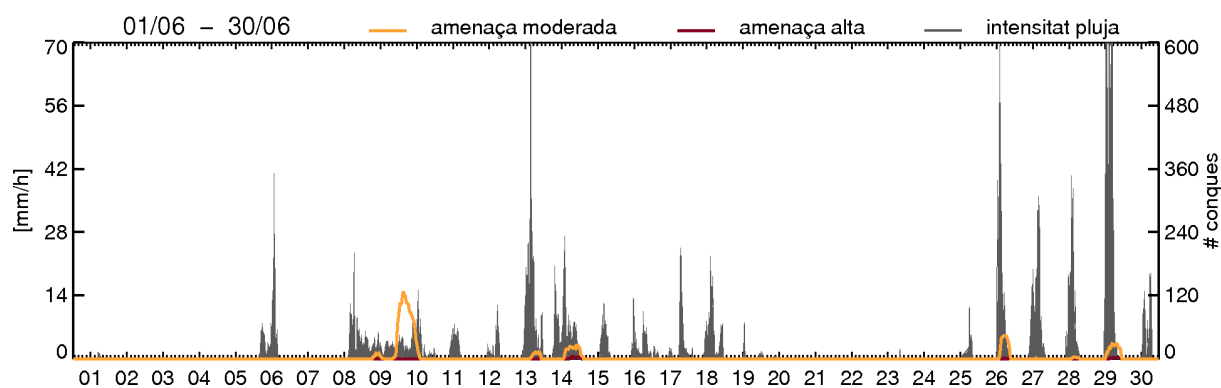


Figura 44. Evolució temporal de la pluja i el total d'alertes a cada pas de temps (mitja hora) durant el mes de juny de 2010.

- Juliol de 2010

El mes de juliol de 2010 presenta un gran contrast amb el mes de juny. Tot i que en comparació no plou tant, el nombre d'alertes registrades és molt major. El mapa d'acumulació (Figura 45) mostra unes acumulacions molt poc uniformes: mentre que en alguns indrets l'acumulació no arriba als 25 mm, en alguns nuclis les acumulacions sobrepassen els 200 mm.

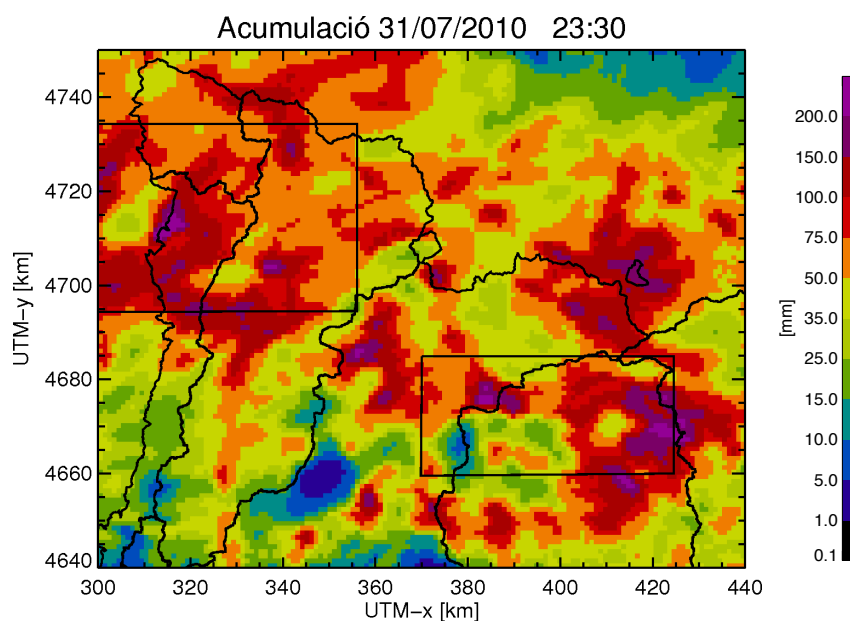


Figura 45. Mapa de pluja acumulada de 1 a 31 de juliol de 2010.

Les Figures 46 i 47 mostren quantes vegades s'han donat alertes d'amença *moderada* i *alta* respectivament a cada conca. Les zones afectades per alertes coincideixen amb els llocs on

l'acumulació de pluja ha estat major i en la majoria dels casos el total d'alertes ha estat d'1 o 2 dies en tot el mes.

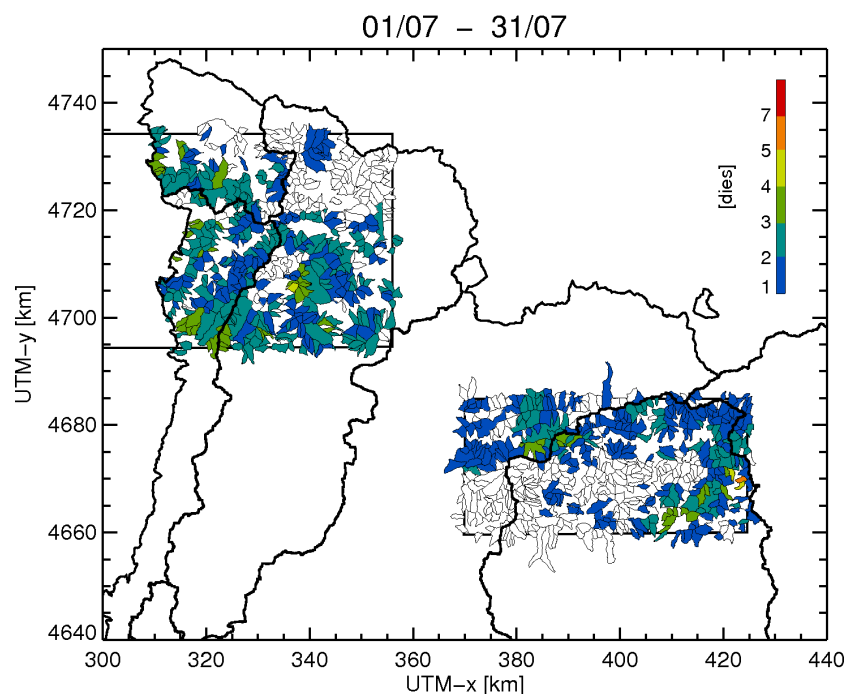


Figura 46. Mapa de la zona d'estudi que mostra el nombre de dies en què s'ha observat una amenaça *moderada* durant el juliol de 2010.

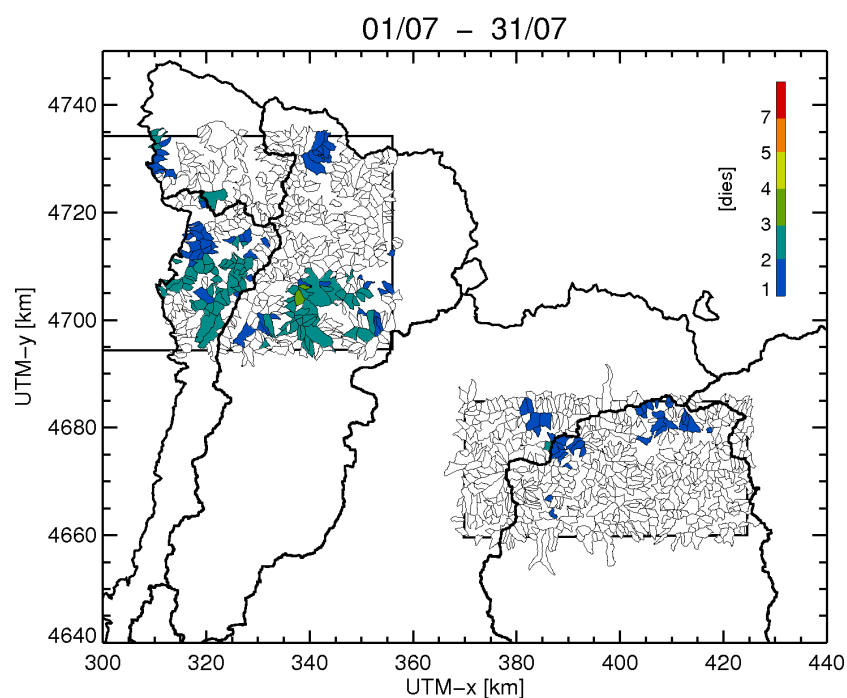
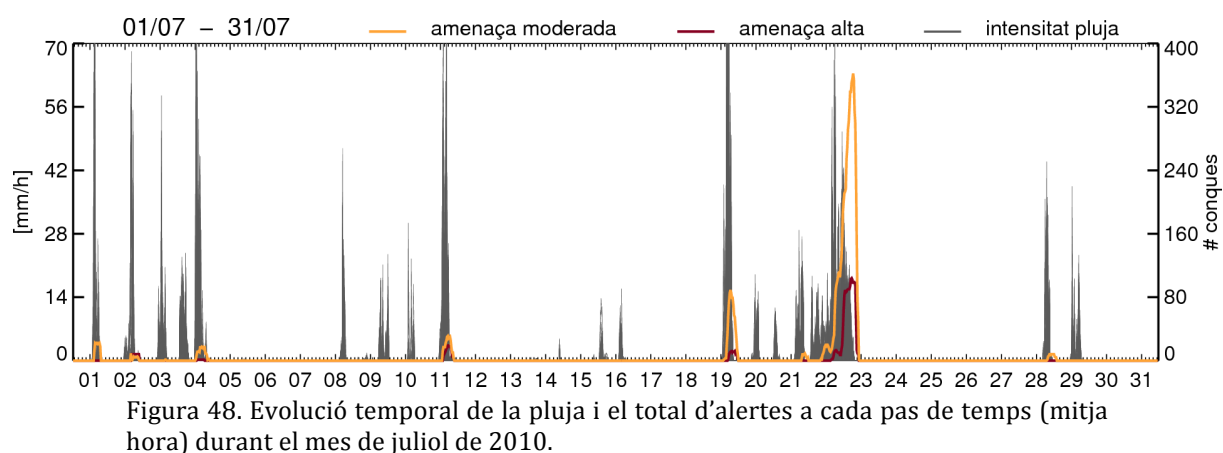


Figura 47. Mapa de la zona d'estudi que mostra el nombre de dies en què s'ha observat una amenaça *alta* durant el juliol de 2010.

Per veure en quin moment han ocorregut aquestes alertes cal veure la sèrie temporal (Figura 48). En aquesta s'observa que l'episodi del 21 al 23 de juliol, que és l'episodi que s'ha fet servir en el capítol 6 com a referència per il·lustrar el funcionament del classificador, és el que provoca la major part d'alertes. A més, en ser un episodi que dura dos dies, en molts casos és el que explica el total de dues alertes en una mateixa conca. Per aquest motiu és d'esperar que el mapa d'alertes màximes de tot el mes s'assembli consideradament al de l'episodi del 21-23 de juliol (Figura 35). Aquest episodi en concret s'analitzarà més en detall més endavant (secció 7.3).



- Octubre de 2010

El mes d'octubre presenta acumulacions més baixes que els mesos presentats anteriorment. El mapa d'acumulacions mostra com les acumulacions màximes no arriben als 150 mm en cap punt de l'àrea d'estudi (Figura 49). En canvi, el mapa que mostra l'alerta màxima registrada durant tot el mes mostra un nombre molt elevat de conques en les que s'hi ha registrat una alerta (Figura 50).

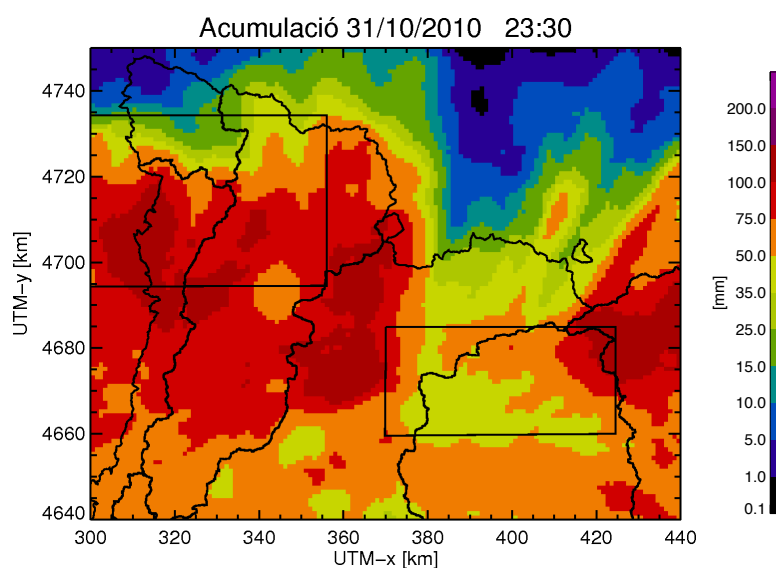


Figura 49. Mapa de pluja acumulada durant el mes d'octubre de 2010.

La sèrie temporal del nombre d'amenaçes i la pluja (Figura 51) mostra quelcom similar al que ocorre en el mes de juliol però d'una manera encara més exagerada: un episodi molt important els dies 9, 10 i 11 d'octubre provoca més de 600 alertes, mentre que en la resta del mes no hi ha cap episodi significatiu ni a nivell de pluja acumulada ni a nivell d'alertes.

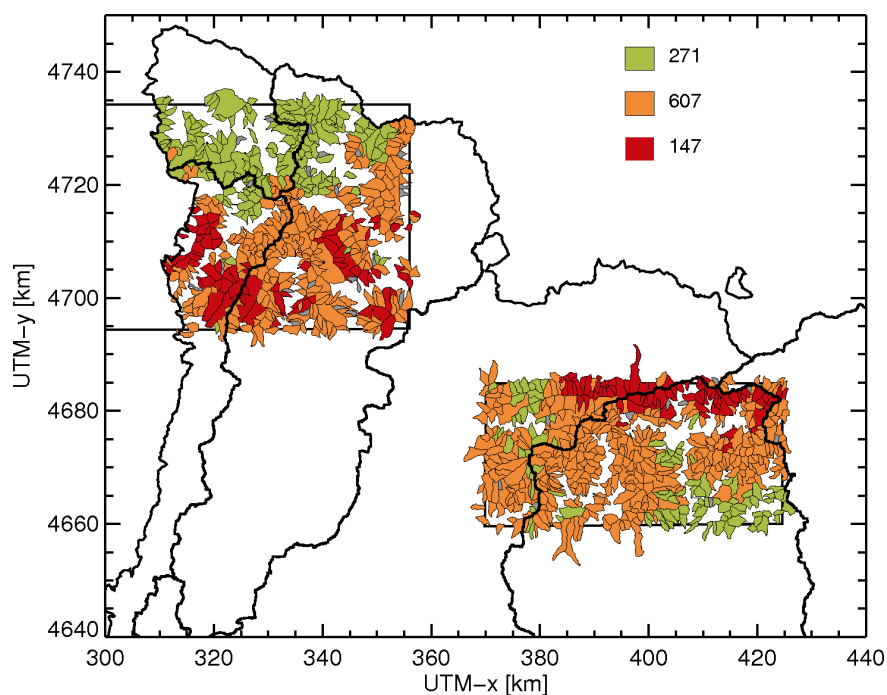


Figura 50. Mapa d'amenaça màxima durant el mes d'octubre de 2010.

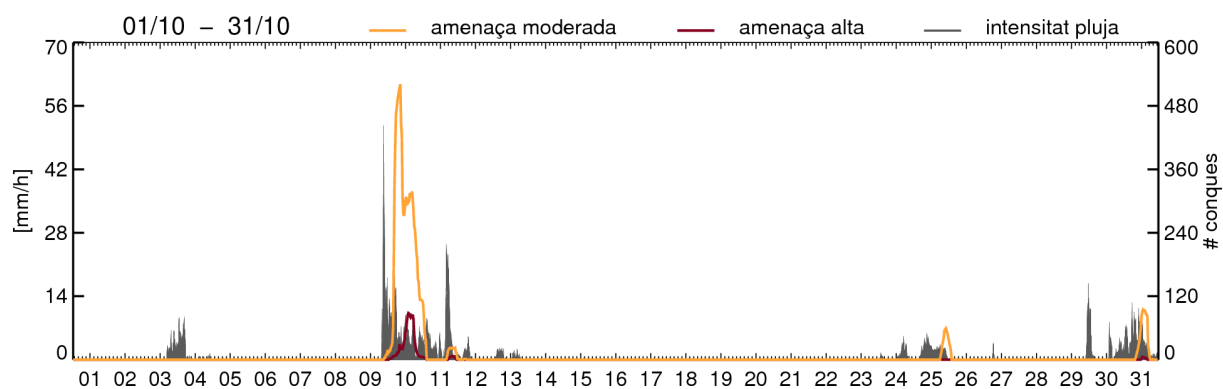


Figura 51. Evolució temporal de la pluja i el total d'alertes a cada pas de temps durant el mes d'octubre de 2010.

7.3 Episodis seleccionats

A continuació s'analitzen alguns episodis seleccionats tot exemplificant el funcionament del classificador amb algunes conques en particular que tenen un comportament d'interès (descrites a la secció 3.1, Figura 4). De les conques presentades, s'ha examinat amb especial interès la conca del Rebaixader ja que gràcies a que està instrumentalitzada es coneix en quins

moments del període hi va haver corrent d'arrossegalls. Tota la informació respecte l'ocurrència o no de corrents d'arrossegalls en aquesta conca, així com l'hora concreta dels esdeveniments s'ha extret de Batlle (2011). En total es tracten tres episodis en els que es va detectar corrents d'arrossegalls a la conca del Rebaixader i dos episodis en els que no, per tal de comprovar si el sistema produeix les alertes en els moments encertats.

- Episodis del 9 i 12 de maig de 2010

L'episodi del 9 de maig de 2010 és un dels episodis de pluja més destacats del mes de maig. De totes maneres, només va afectar de manera significativa a la zona situada més al sud-oest de l'àrea d'estudi on les acumulacions van sobrepassar els 25mm (Figura 6). El total d'alertes en tota l'àrea d'estudi va ser de quatre i es van produir a partir de les 1830UTC (Figura 52).

A la conca del Rebaixader (Figura 4) se sap que no va ocórrer cap corrent d'arrossegalls. En comprovar el funcionament del classificador, es constata que en aquesta ocasió l'actuació és satisfactòria, ja que no presenta alerta en cap moment (Figura 53).

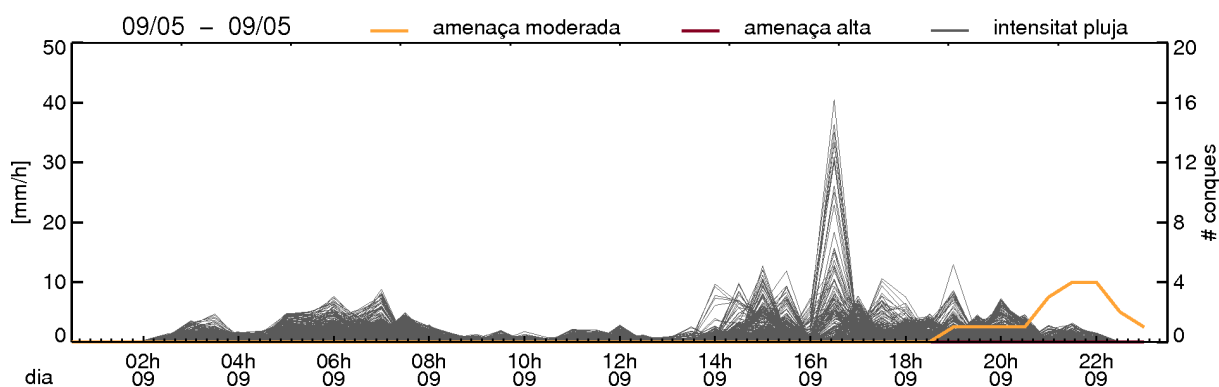


Figura 52. Evolució temporal de la pluja i el total d'alertes a cada pas de temps durant l'episodi del 9 de maig de 2010.

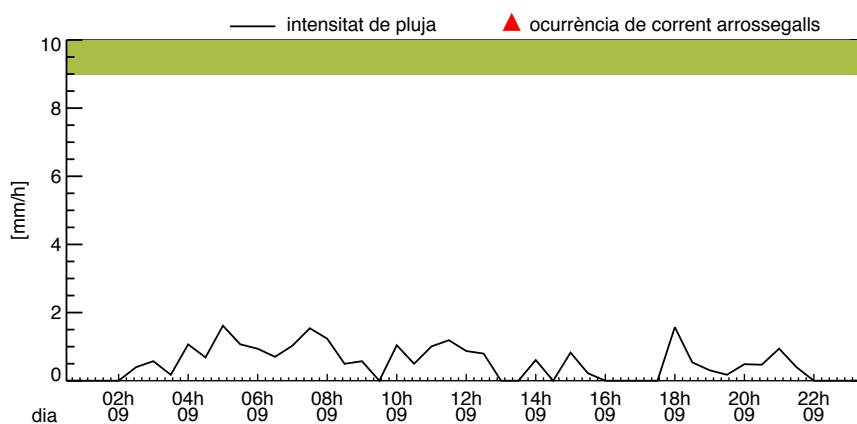


Figura 53. Evolució temporal de la pluja (mm/h) i el nivell d'amenassa a la conca del Rebaixader durant l'episodi del 9 de maig de 2010.

És interessant conèixer com ha estat considerada la severitat de l'episodi pel classificador. Per aquest motiu la Figura 54 mostra l'evolució temporal del % d'àrea inestable calculada en cada pas de temps. Així, es comprova que en amb prou feines es va superar el llindar d'1% d'àrea inestable a partir de les 16 hores d'episodi. Si es recorden les funcions de pertinença de les variables dinàmiques (Figura 28), amb aquests valors de % d'àrea inestable, els graus de pertinença que s'assignen a les categories de pluja *feble*, *moderada* i *severa* són 1.0, 0.0, i 0.0 respectivament, de manera que d'acord amb les regles difuses, sembla raonable que la categoria final d'amenaça sigui *molt baixa*.

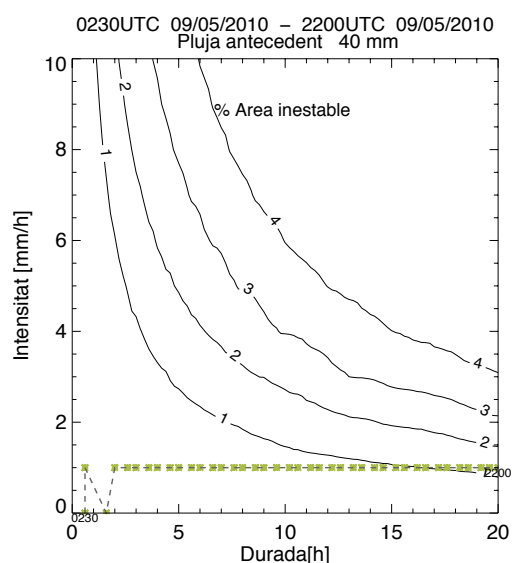


Figura 54. Evolució temporal del % d'àrea inestable a la conca del Rebaixader de les 0230UTC a les 2200UTC del dia 9 de maig de 2010. Els colors representen l'amenaça en cada pas de temps: verd per amenaça *molt baixa*, taronja per amenaça *moderada* i vermell per amenaça *alta*. Les parelles intensitat-durada són les més desfavorables per a cada pas de temps.

Per comprovar que el radar no està afectat per errors durant l'episodi, s'han comparat les dades que aquest proporciona amb registres de pluviòmetres propers a la zona. Les diferències entre els dos són petites, de manera que es pot afirmar que el radar va funcionar raonablement bé durant l'episodi (Figura 55).

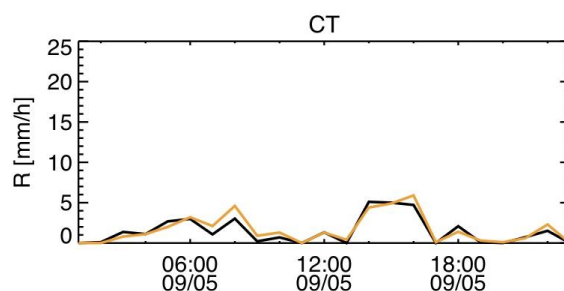


Figura 55. Comparació del registre d'un pluviògraf proper a la conca del Rebaixader (negre) i les dades proporcionades pel radar (groc) en l'episodi del 9 de maig de 2010.

Durant el 12 de maig, tal com ja s'ha comentat en la presentació de l'episodi a la secció 3.2.2, la pluja acumulada no va arribar als 10mm en gran part de l'àrea d'estudi (Figura 7). Tot i ploure de manera continuada durant tot el dia, no es va registrar cap alerta (Figura 56). En la conca del Rebaixader no es té constància tampoc de cap corrent d'arrossegalls, de manera que en aquest cas el classificador funciona bé.

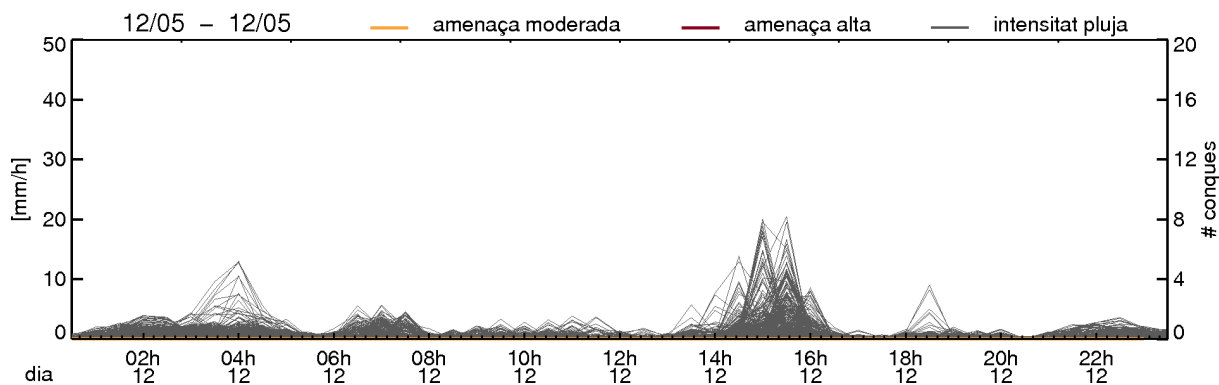


Figura 56. Evolució temporal de la pluja i el total d'alertes a cada pas de temps durant l'episodi del 12 de maig de 2010.

- Episodi del 11 de juliol de 2010

Tal com s'ha descrit en la secció 3.2.2, en aquest episodi es van donar intensitats i acumulacions molt altes en àrees molt puntuals (Figura 8). En el mapa d'alertes màximes registrades al llarg de l'episodi s'adverteix de forma clara que les conques en les que hi ha alertes estan situades a les zones on es va registrar més pluja (Figura 57).

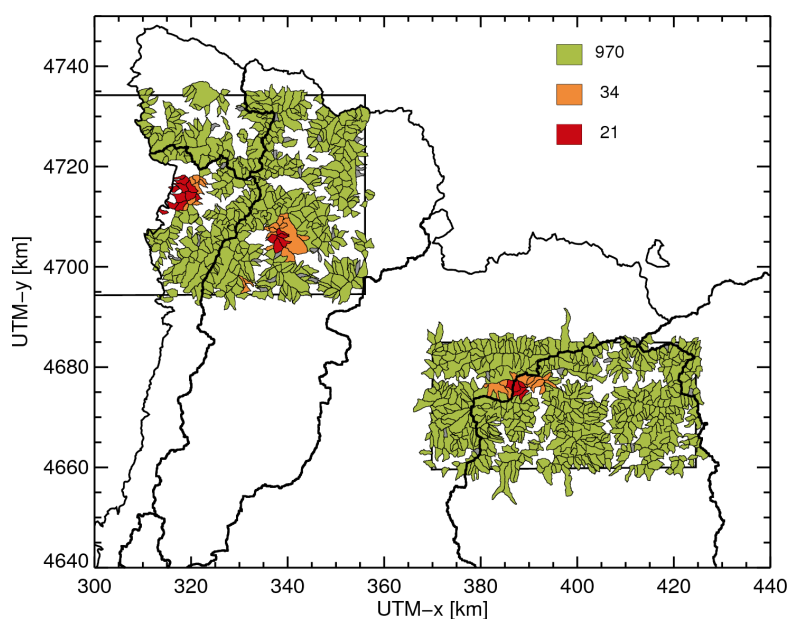


Figura 57. Mapa d'amenaces màximes en l'episodi del 11 de juliol. Color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*. Els números de la llegenda indiquen el nombre de conques classificades a cada categoria.

Examinant l'evolució temporal de l'episodi (Figura 58), es veu com el sistema desenvolupat produeix les primeres alertes amb unes dues hores de retard respecte el moment en què comença a ploure. Quan deixa de ploure, les alertes es mantenen encara una estona. Aquest comportament és degut a què el sistema no considera finalitzat l'episodi fins 3h després de que deixa de ploure.

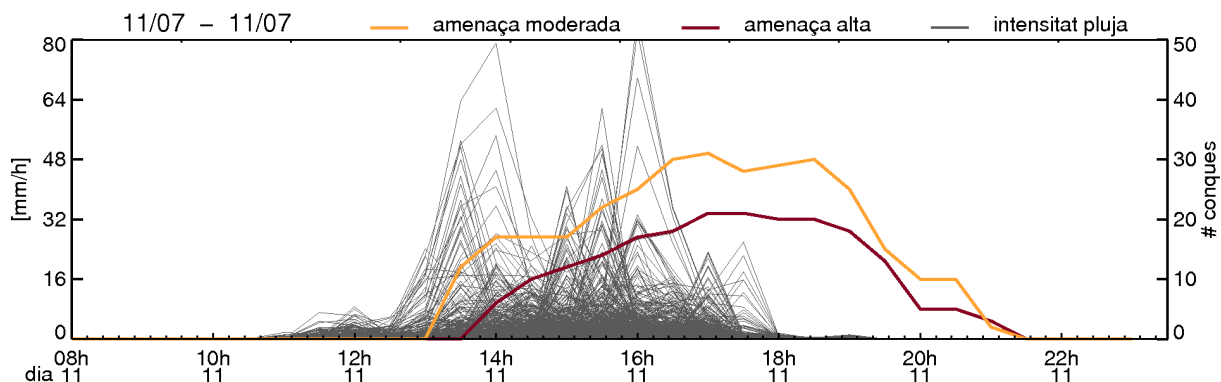


Figura 58. Evolució temporal de la pluja i el total d'alertes a cada pas de temps durant l'episodi del 11 de juliol de 2010.

La conca del Rebaixader és una de les conques on hi plou amb més intensitat: més de 50mm/h durant una hora. A les 1330UTC hi salta l'alerta moderada, i de seguida, a les 1400UTC salta l'alerta d'amença alta. Aquesta hora coincideix amb el moment en què els geòfons instal·lats a la conca van detectar vibracions que es van identificar com un corrent d'arrossegalls (Batlle, 2011). En aquest episodi, per tant, el classificador funciona correctament (Figura 59).

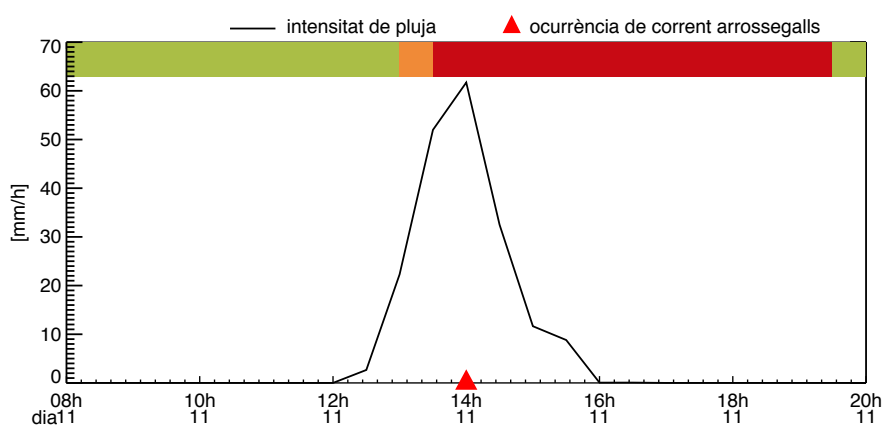


Figura 59. Evolució temporal de la pluja (mm/h) i el nivell d'amença a la conca del Rebaixader durant l'episodi del 11 de juliol de 2010.

És important recordar que per calcular el % d'àrea inestable no es pren la intensitat mitjana en aquell pas de temps, sinó que es té en compte la finestra de temps que dona un % d'àrea inestable més desfavorable. Per exemple, a les 1400UTC portava 2 hores plovent amb una intensitat mitjana de 35mm/h i 70 mm acumulats però el % d'àrea inestable major és provocat

per les últimes 1.5 hores, és a dir, de les 1230UTC a les 1400UTC en què la intensitat mitjana és de 45 mm/h. La Figura 60 ho il·lustra amb l'evolució del % d'àrea inestable des de les 1200UTC fins les 1800UTC.

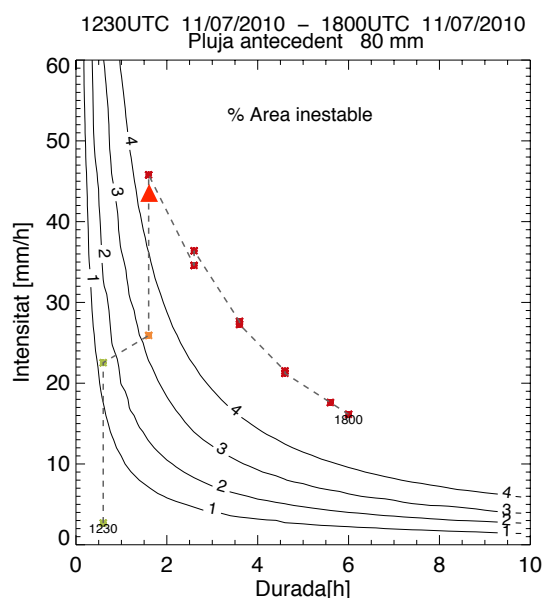


Figura 60. Evolució temporal del % d'àrea inestable a la conca del Rebaixader de les 1230UTC a les 1800UTC del dia 11 de juliol de 2010. Els colors representen l'amença en cada pas de temps: verd per amenaça *molt baixa*, taronja per amenaça *moderada* i vermell per amenaça *alta*. Les parelles intensitat-durada són les més desfavorables per a cada pas de temps.

- Episodi del 21-23 de juliol de 2010

L'episodi del 21-23 de juliol és el segon més important del període de maig a octubre pel que fa a nombre d'alertes. La Figura 35 mostra el mapa d'alertes màximes ocorregudes en aquests tres dies mentre que la Figura 61 mostra l'evolució temporal d'aquestes alertes. L'episodi comença amb intensitats moderades ja durant la tarda del dia 21 de juliol. Aquestes continuen de forma gairebé continuada fins al final de l'episodi, però les primeres alertes moderades no s'activen fins les 0900UTC del dia 22. El nombre d'alertes creix de manera substancial només a partir de les 1800UTC, després d'un pic en la intensitat de pluja.

Les 1800UTC del dia 22 de juliol sembla un moment rellevant de l'episodi, ja que s'observen les intensitats més altes en mitja hora. Seria interessant analitzar on s'està donant aquesta pluja i si correspon amb les alertes d'aquella mateixa hora. La Figura 62 mostra la intensitat i la pluja acumulada en aquest pas de temps. També es comprova que efectivament és allà, a la part més occidental de l'àrea d'estudi on apareixen les primeres alertes (Figura 63).

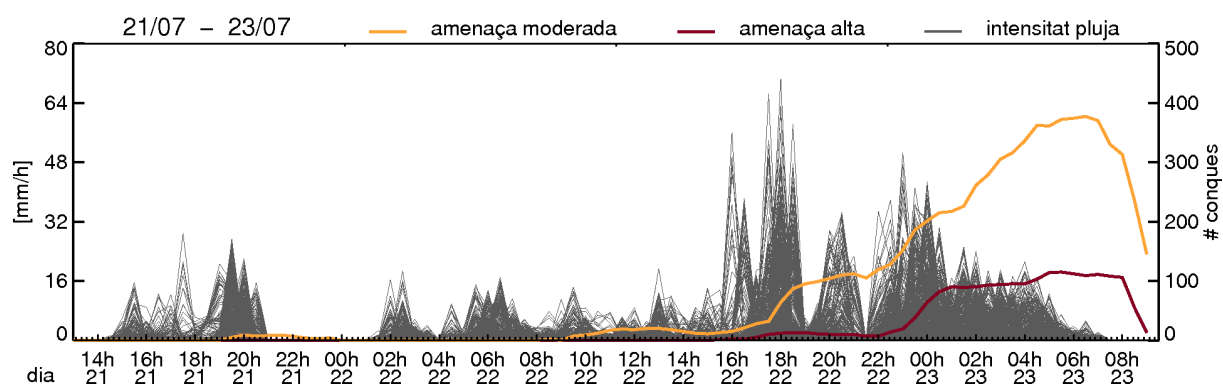


Figura 61. Evolució temporal de la pluja i el total d'alertes a cada pas de temps durant l'episodi del 21 al 23 de juliol de 2010.

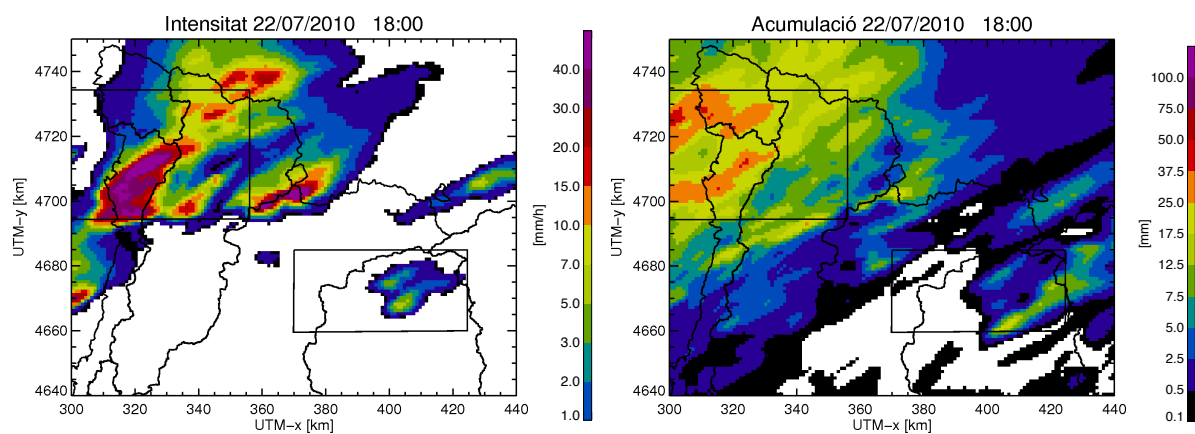


Figura 62. Intensitat de pluja (*esquerra*) i acumulació de pluja (*dreta*) a les 1800UTC del dia 22 de juliol de 2010

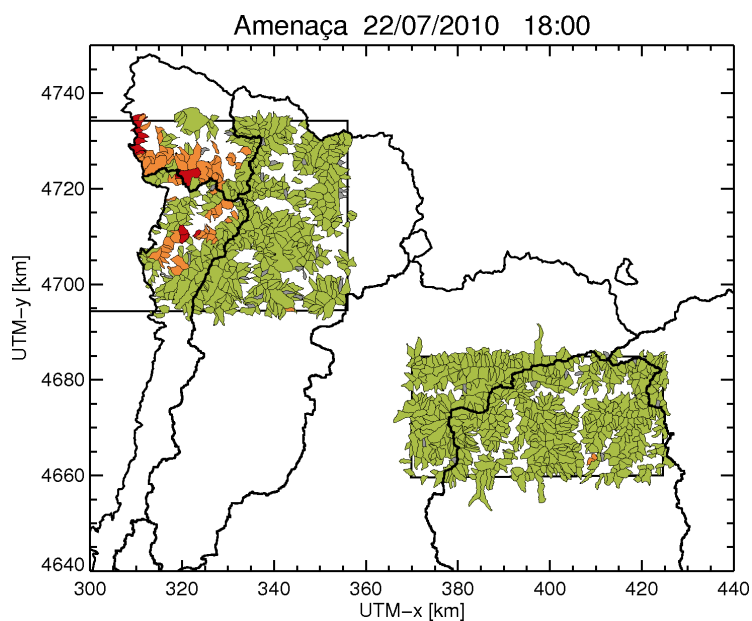


Figura 63. Mapa d'amenaces el dia 22 de juliol a les 1800UTC. Color verd: *amença baixa*; color taronja *amença moderada*; color vermell: *amença alta*.

Concretament, la conca del Rebaixader forma part del gruix de conques en les que s'activa l'alerta durant la matinada del dia 23, concretament a les 0030UTC. La Figura 64 mostra l'evolució temporal de la pluja registrada en aquella conca. En aquest cas, els geòfons van registrar vibracions a les 0600UTC del dia 22 de juliol. Per les característiques d'aquestes vibracions, però, es va determinar que el fenomen no arribava a ser un corrent d'arrossegalls sinó que es tractava més aviat d'un flux hiperconcentrat (*debris flood*).

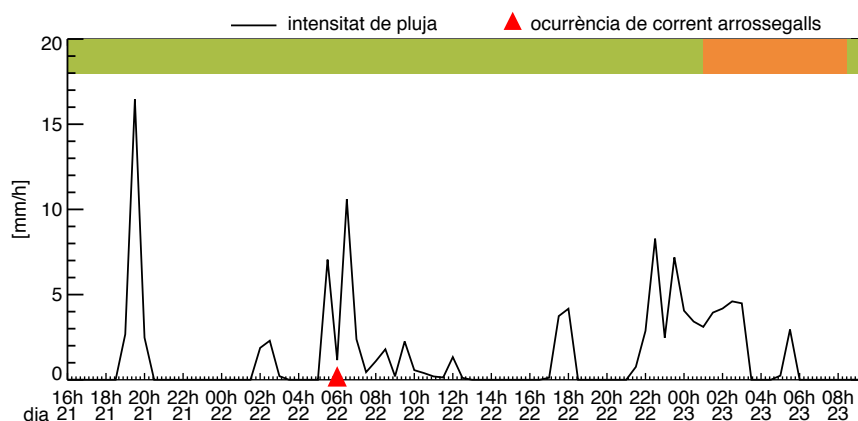


Figura 64. Evolució temporal de la pluja (mm/h) i el nivell d'amença a la conca del Rebaixader durant l'episodi del 21-23 de juliol de 2010.

Per tant, en aquest cas el sistema no ha previst l'esdeveniment en l'instant en què es va detectar el flux hiperconcentrat. Per tal d'identificar les causes d'aquest comportament, cal veure quins valors han pres la intensitat i durada de l'episodi en cada instant. El primer que es detecta observant la Figura 64 és que la pluja no és continuada, sinó que s'atura de les 2030UTC del dia 21 fins a les 0130UTC del dia 22, i després des de les 1230UTC fins a les 1700UTC del mateix dia. Com que el sistema s'ha dissenyat per tal que es consideri acabat l'episodi tres hores més tard del moment en què deixa de ploure, el sistema considera en aquest cas dos episodis. El primer comença a les 0130UTC del dia 22 i per tant no té en compte el pic de pluja que hi ha cinc hores abans, i el segon episodi comença a les 1730UTC del dia 22. En la Figura 65 es pot veure l'evolució dels valors de % d'àrea inestable en aquests dos episodis diferenciats.

Així, en el moment en què es produeix el corrent d'arrossegalls, la finestra de temps més desfavorable són les últimes 4 hores que observen una intensitat mitjana de 2.8 mm/h. El % d'àrea inestable pren llavors el valor de 0.55. Amb tal valor d'àrea inestable els graus de pertinença a les categories de pluja *feble*, *moderada* i *severa* són de 1, 0 i 0 respectivament.

D'això se'n extreu, que la finestra de tres hores considerada té una influència molt gran. En aquest episodi, probablement el comportament canviaria si la finestra fos més llarga.

Un altre factor que fa que l'amença moderada aparegui relativament tard és la susceptibilitat. Tot i que a la conca del Rebaixader la categoria *molt susceptible* té el major grau de pertinença amb un valor de 0.58, aquest no es diferencia gaire del grau de pertinença a la classe

moderadament susceptible, que és 0.53. A la categoria *poc susceptible* hi presenta un grau de pertinença de 0.38.

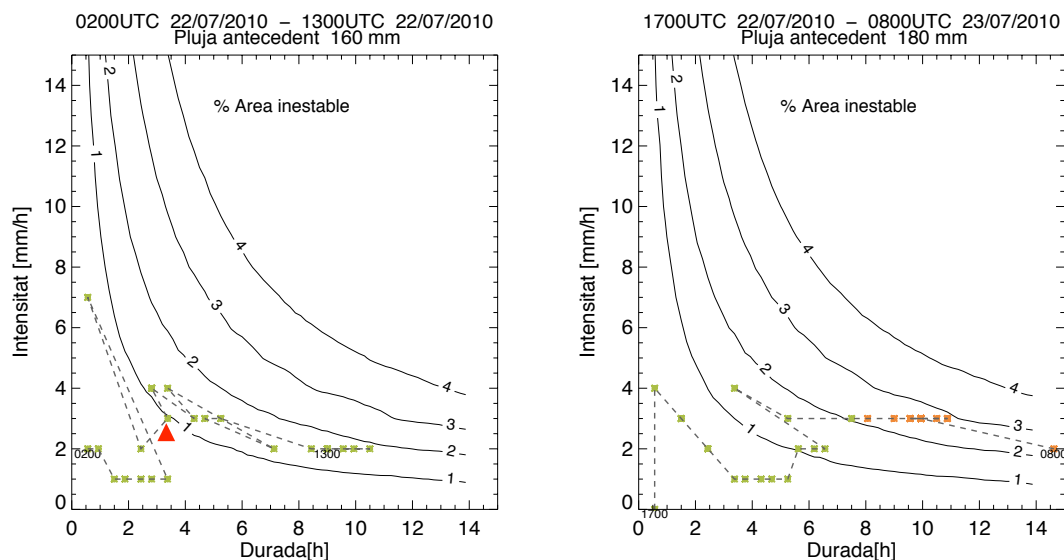


Figura 65. Evolució temporal del % d'àrea inestable a la conca del Rebaixader. Els colors dels punts representen l'amenaça en cada pas de temps: verd per amenaça *molt baixa*, taronja per amenaça *moderada* i vermell per amenaça *alta*. Les parelles intensitat-durada són les més desfavorables per a cada pas de temps. *Esquerra*: de les 0130UTC a les 1300UTC del dia 22 de juliol. *Dreta*: de les 1730UTC del dia 22 a les 0800UTC del dia 23 de juliol.

Per tal de descartar la possibilitat que el radar estigui subestimant la pluja, s'han comparat de nou les dades de pluja radar amb els registres dels pluviòmetres situats a la mateixa conca (Hürlimann, comunicació personal, 2012). En la Figura 66 s'aprecia com ambdós s'ajusten raonablement bé.

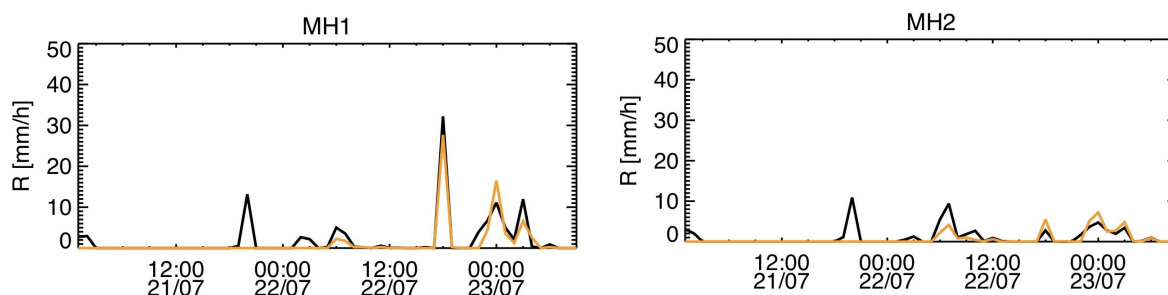


Figura 66. Comparació del registre dels pluviògrafs situats a la conca del Rebaixader (negre) i les dades proporcionades pel radar (groc) en l'episodi del 21 al 23 de juliol de 2010.

Per altra banda, a la conca del Torrent d'Erill es va produir un corrent d'arrossegalls però no se'n coneix l'hora exacta. Tan sols es va poder estimar que va ocórrer entre la tarda i la nit del dia 22 de juliol (Hürlimann, comunicació personal 2012). En aquest cas, el sistema ha funcionat de manera satisfactòria ja que l'alerta s'activa al llarg de tota la tarda d'aquest dia (Figura 67).

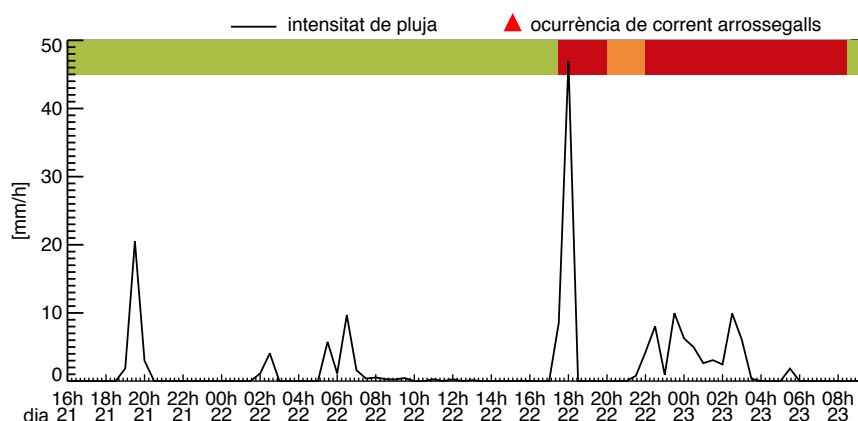


Figura 67. Evolució temporal de la pluja (mm/h) i el nivell d'amença a la conca del Torrent d'Erill durant l'episodi del 21-23 de juliol de 2010.

Pot resultar curiós que l'alerta s'activi a les 1700UTC, just abans del pic més alt d'intensitat de pluja. La Figura 68 n'aclareix el motiu: per aquesta conca l'episodi comença a les 0130UTC del dia 22, i no acaba fins les 0600UTC del dia següent. En aquest temps, mai deixa de ploure més de tres hores seguides, de manera que encara que la intensitat de pluja sigui molt feble, la llarga durada fa que amb molt poca intensitat mitjana el % d'àrea inestable sigui elevat. Per aquest motiu, a les 1700UTC, a causa d'un lleuger augment de la intensitat mitjana s'activa una alerta alta sense haver passat per una alerta moderada (Figura 68). Per les durades superiors a 20 hores s'han considerat valors equivalents als de les 20h perquè és el rang màxim de les corbes ID utilitzades.

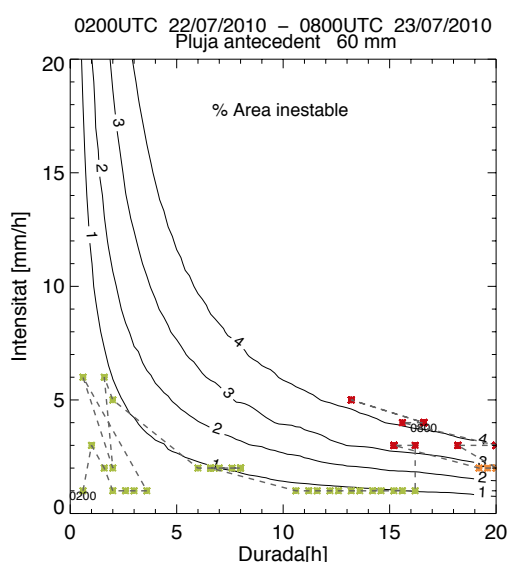


Figura 68. Evolució temporal del % d'àrea inestable a la conca del Torrent d'Erill de les 0130UTC del dia 22 a les 0800UTC del dia 23 de juliol. Els colors dels punts representen l'amença en cada pas de temps: verd per amenaça *baixa*, taronja per amenaça *moderada* i vermell per amenaça *alta*. Les parelles intensitat-durada són les més desfavorables per a cada pas de temps.

En aquest episodi també se sap del succés d'un corrent d'arrossegalls a Port Ainé, però tampoc se'n coneix l'hora exacta (Abancó, comunicació personal, 2012). En aquest cas, però, el corrent d'arrossegalls no es va desenvolupar a partir d'una gran esllavissada sinó que es va formar al llarg del canal (*in-channel debris flow*), de manera que podria passar que el sistema d'alerta no ho detectés. No obstant, el nivell d'alerta que dóna en aquest cas és d'amenaça moderada a partir de les 2330UTC del dia 22 de juliol, que passa a amenaça alta a les 0230UTC del dia següent (Figura 69).

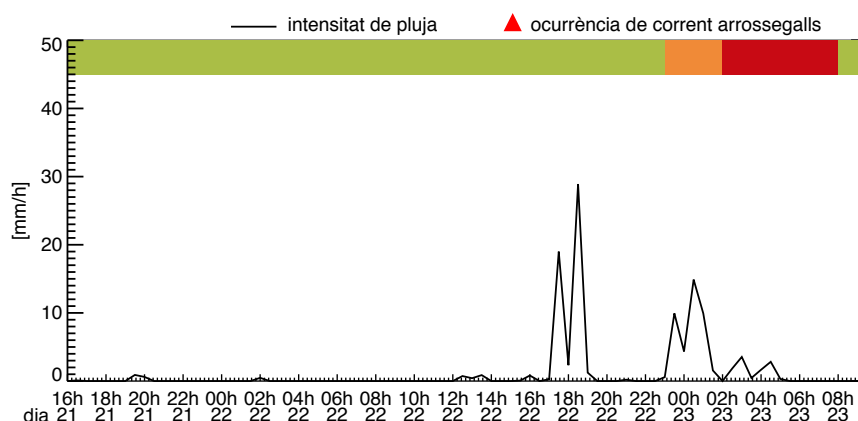


Figura 69. Evolució temporal de la pluja (mm/h) i el nivell d'amenaça a la conca de Port Ainé durant l'episodi del 21-23 de juliol de 2010.

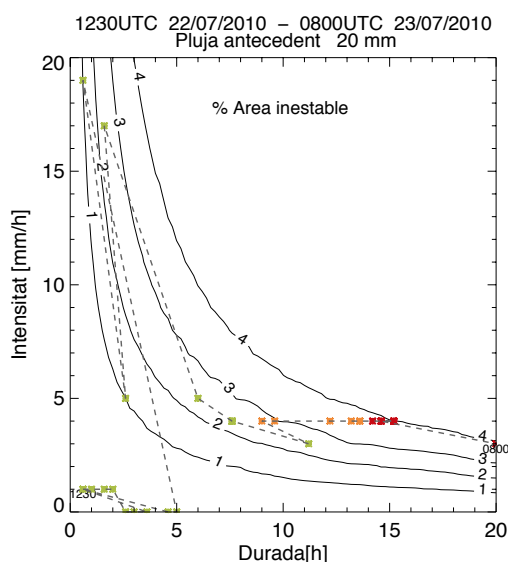


Figura 70. Evolució temporal del % d'àrea inestable a la conca de Port Ainé de les 1200UTC del dia 22 a les 0800UTC del dia 23 de juliol. Els colors dels punts representen l'amenaça en cada pas de temps: verd per amenaça *molt baixa*, taronja per amenaça *moderada* i vermell per amenaça *alta*. Les parelles intensitat-durada són les més desfavorables per a cada pas de temps.

- Episodi del 9-10 d'octubre de 2010

La Figura 71 mostra com l'episodi de pluja comença en algunes conques cap a les 2000UTC del dia 9 d'octubre. De manera semblant al que passava en l'episodi del 21 al 23 de juliol, les alertes s'activen per primer cop unes hores després. Més tard, aproximadament entre les 0500UTC i les 1000UTC és quan es comptabilitza el major nombre d'alertes tant de l'episodi i com també de tot el període de maig a octubre.

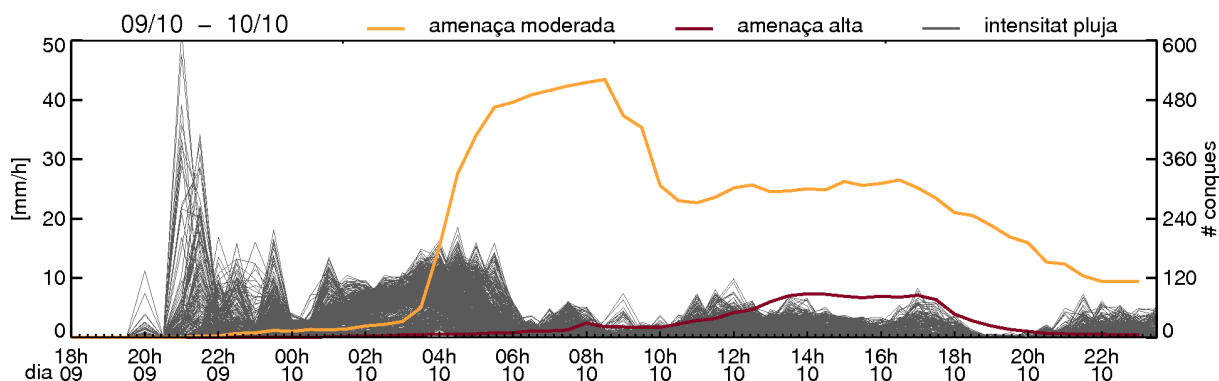


Figura 71. Evolució temporal de la pluja i el total d'alertes a cada pas de temps durant l'episodi del 9-10 d'octubre de 2010.

La Figura 72 il·lustra la intensitat de pluja i l'acumulació en dos moments claus de l'episodi: els pics d'intensitat de les 2130UTC del dia 9 i el pic d'alertes de les 0500UTC del dia 10.

La conca de Rebaixader es troba en la zona on a l'inici de l'episodi es registren intensitats de pluja puntualment molt altes. En aquesta conca el dia 9 a les 2100UTC es va registrar un flux hiperconcentrat (Abancó, comunicació personal, 2012), però el sistema falla, ja que la primera alerta s'encén a les 0130UTC del dia 10 d'octubre (Figura 73).

El per què s'explica de forma similar al cas anterior del 21-23 de juliol: la forma de les corbes ID fan que pluges curtes i intenses obtinguin % d'àrea inestable molt inferiors a pluges llargues i de baixa intensitat. La Figura 74 mostra l'evolució temporal del % d'àrea inestable des de les 2100UTC del dia 9 fins a les 2030 UTC del dia 10.

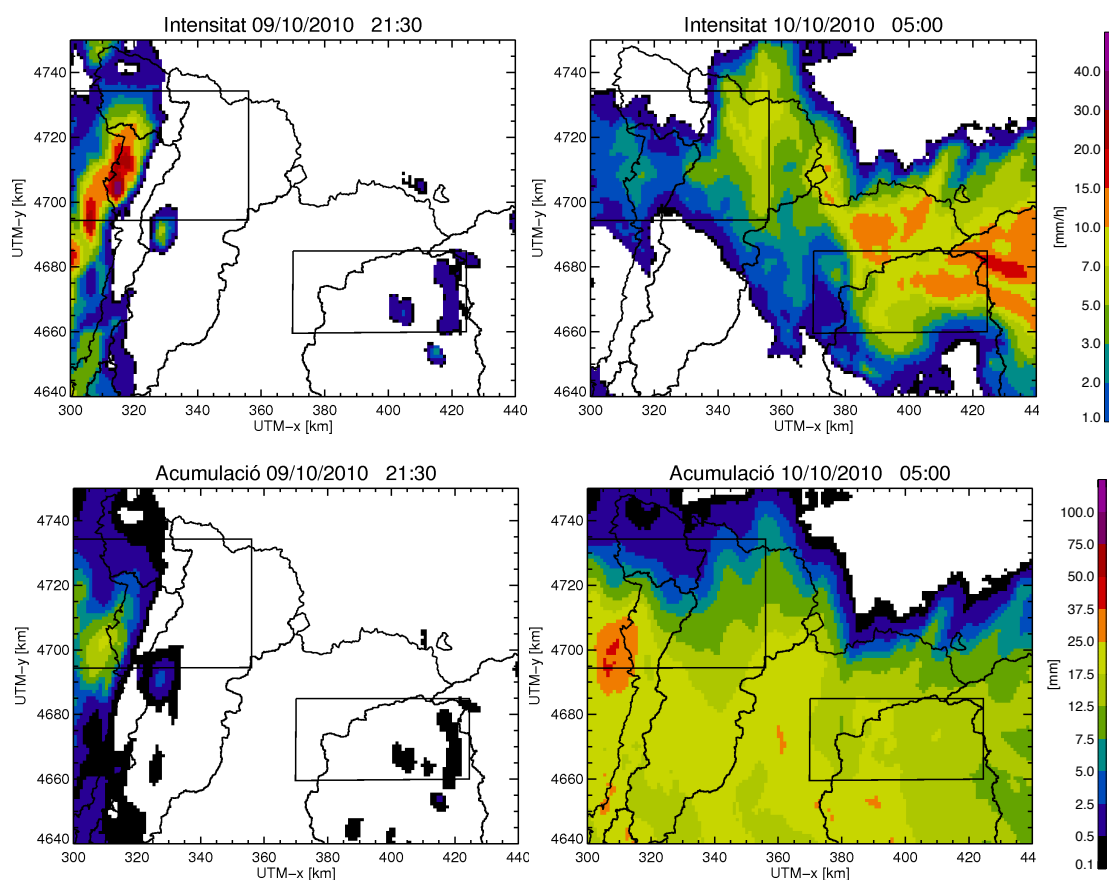


Figura 72. Mapa d'intensitat de pluja i pluja acumulada (de dalt a baix) en diferents passos de l'episodi del 9-10 d'octubre. Esquerra: 2130UTC del dia 09/10/2010; dreta: 0430UTC del dia 10/10/2010.

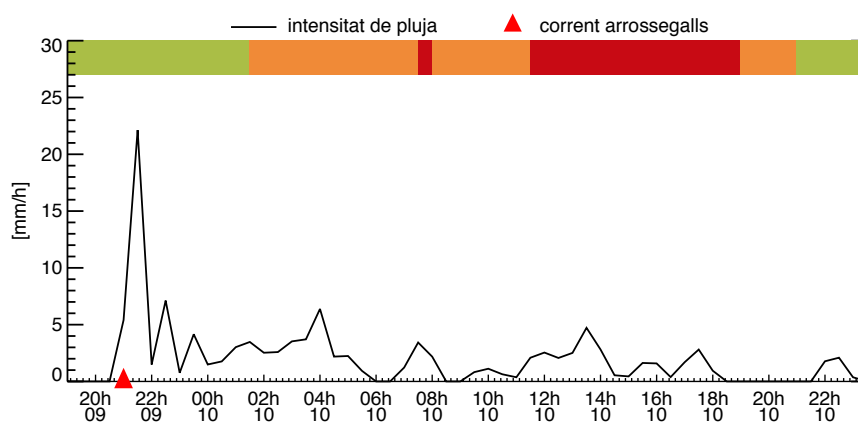


Figura 73. Evolució temporal de la pluja (mm/h) i el nivell d'amença a la conca del Rebaixader durant l'episodi del 9-10 d'octubre de 2010.

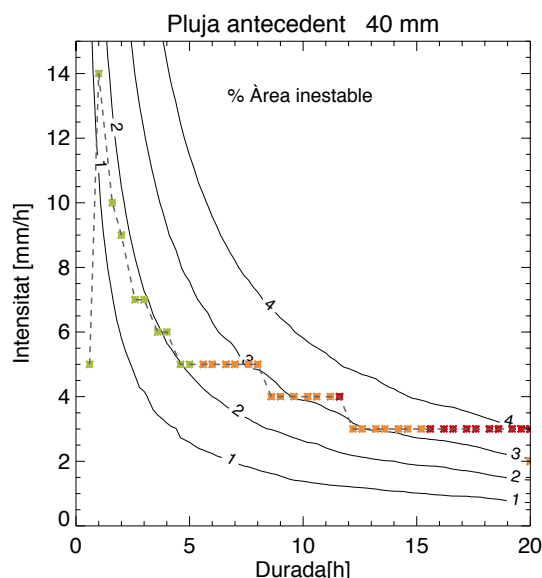


Figura 74. Evolució temporal del % d'àrea inestable a la conca del Rebaixader de les 2100UTC del dia 9 fins les 2030UTC del dia 10 d'octubre de 2010. Els colors dels punts representen l'amença en cada pas de temps: verd per amenaça *molt baixa*, taronja per amenaça *moderada* i vermell per amenaça *alta*. Les parelles intensitat-durada són les més desfavorables per a cada pas de temps.

Per altra banda, és interessant veure en quines conques es situen totes les alertes del matí del dia 10. La Figura 75 mostra l'estat de les amenaces a les 0500UTC. S'aprecia que gran part d'aquestes estan situades a la zona sud-est de l'àrea d'estudi, que en aquests instants registra acumulacions entre 12 i 25mm. Resulta rellevant analitzar amb més detall el que succeeix, ja que moltes d'aquestes conques tenen susceptibilitats baixes.

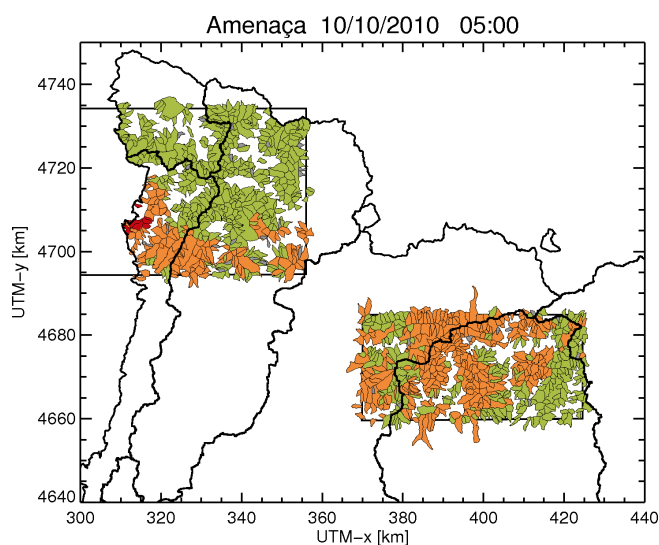


Figura 75. Mapa d'amenaces el dia 10 d'octubre a les 0500UTC. Color verd: amenaça *baixa*; color taronja amenaça *moderada*; color vermell: amenaça *alta*.

La conca de Pratmajor és una d'aquestes conques que té una susceptibilitat baixa i presenta una alerta d'amença moderada en aquest episodi. Les Figures 76 i 77 il·lustren el comportament de la conca al llarg de l'episodi. Resulta interessant remarcar, que a diferència del cas de les conques del Rebaixader i del torrent d'Erill, en què les alertes moderades s'assolien només passar el llindar del 2% d'àrea inestable, a Pratmajor cal passar el llindar del 3% d'àrea inestable per tal que el classificador doni un amenaça *moderada*. El motiu és que la susceptibilitat a Pratmajor és molt més baixa. Concretament, els graus de pertinença a les categories de *poc*, *moderadament* i *molt* susceptible són 0.86, 0.29 i 0.0 respectivament. En aquest cas no es pot jutjar si el classificador funciona correctament, ja que no es coneix si va haver un corrent d'arrossegalls o no.

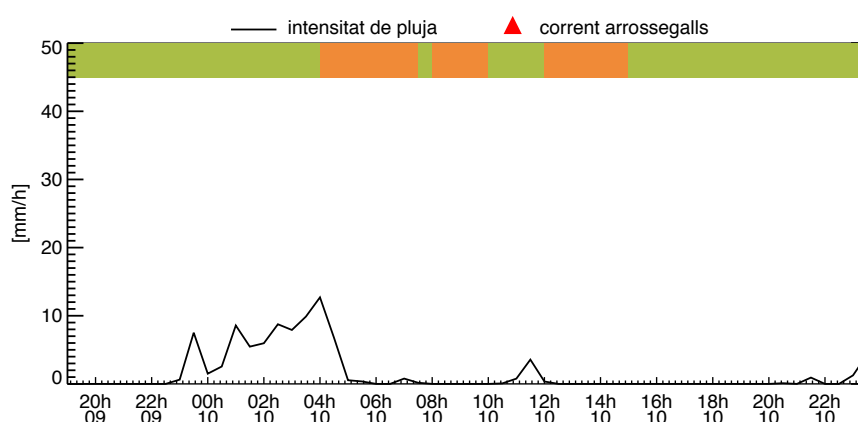


Figura 76. Evolució temporal de la pluja (mm/h) i el nivell d'amença a la conca de Pratmajor durant l'episodi del 9-10 d'octubre de 2010.

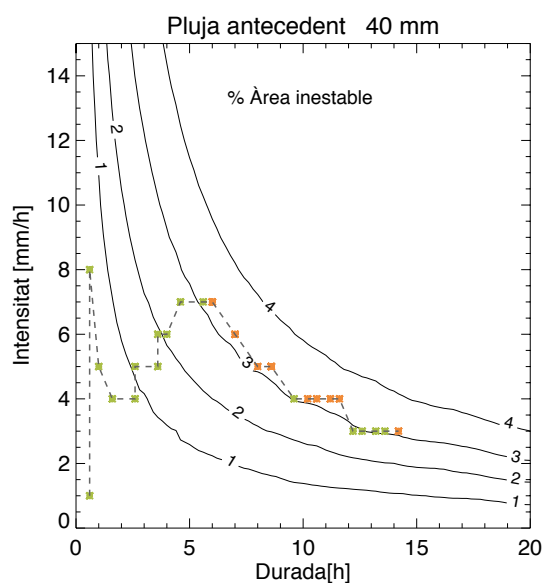


Figura 77. Evolució temporal del % d'àrea inestable a la conca de Pratmajor de les 2300UTC del dia 9 fins les 1230UTC del dia 10 d'octubre de 2010. Els colors dels punts representen l'amença en cada pas de temps: verd per amenaça *baixa*, taronja per amenaça *moderada* i vermell per amenaça *alta*. Les parelles intensitat-durada són les més desfavorables per a cada pas de temps.

7.4 Discussió dels resultats

En aplicar el sistema de classificació al llarg dels mesos de maig a octubre de 2010, en la majoria de conques es dispara una d'alerta d'amenaça moderada o alta com a mínim una vegada. La majoria són alertes moderades i corresponen a dos episodis concrets: l'episodi del 21 al 23 de juliol i del 9 al 10 d'octubre. Les zones en les que es comptabilitzen més alertes són aquelles que o bé tenen una susceptibilitat més alta o bé s'hi han registrat les acumulacions de pluja més elevades.

En comparar les sèries temporals de pluja i nombre d'amenaques s'adverteix que les amenaces apareixen amb molta més facilitat per durades llargues que per intensitats altes en períodes curts. Així, en alguns episodis amb pluja intensa només durant mitja hora o una hora no s'ha registrat cap alerta. En canvi, els episodis més llargs són els que han desencadenat un major nombre d'alertes. En aquest sentit, la forma de les corbes intensitat-durada és crucial per determinar quin tipus d'episodis de pluja són propicis a causar corrents d'arrossegalls.

Tot i que tant en els càlculs com en les gràfiques s'ha tingut en compte, al llarg del capítol no s'ha fet menció a la influència de la pluja antecedent. Com ja s'havia comentat anteriorment, les corbes intensitat-durada-pluja antecedent emprades són molt poc sensibles a la pluja antecedent, de manera que no és rellevant per la interpretació dels resultats.

La definició d'episodi també es detecta com un factor clau. L'execució s'ha dut a terme considerant un coixí de tres hores sense pluja al final de l'episodi, però com s'ha vist en el cas de la conca del Rebaixader durant l'episodi de 21-23 de juliol, considerar aquest lapse de temps menor o major podria canviar radicalment el resultat.

CAPÍTOL 8

CONCLUSIONS I DISCUSSIÓ

8.1 Resum de la tesina

L'objectiu de la tesina era desenvolupar un sistema d'alerta de corrents d'arrossegalls que integrés dades de radar i que es basés en conceptes de lògica difusa. Es partia dels resultats obtinguts en treballs anteriors: una sèrie de paràmetres geomorfològics que s'han fet servir com a variables d'entrada (Chevalier, [-]) i d'unes corbes intensitat-durada-pluja antecedent que relacionaven aquestes característiques de l'episodi de pluja amb la inestabilitat del terreny que aquestes provocaven (Medina i Zappa, 2011).

En primer lloc, com que era inviable usar les 18 variables de què es disposava en un inici, ha calgut acotar el nombre de variables a una quantitat més manejable. Per determinar les variables més rellevants s'ha analitzat la distribució dels valors de les variables en la mostra, diferenciant les conques reactives (s'hi ha identificat un corrent d'arrossegalls) de les no reactives (no s'hi ha detectat cap). Donada una variable, les dues corbes de probabilitat condicionada a la reactivitat (per cada interval, nombre de conques reactives entre el total de reactives o nombre de conques no reactives entre el total de no reactives) se solapen en un cert grau. Si l'àrea de solapament és molt petita, significa que el rang de valors de la variable pels quals la conca és reactiva és molt diferent que el rang de valors pels quals la conca és no reactiva. Per tant, aquesta variable és molt útil per discernir entre conques reactives i no reactives. Aquest criteri, que té l'avantatge de ser molt simple i intuïtiu, és el que s'ha utilitzat. Les variables més importants segons aquest criteri han estat la cota, el pendent mitjà de la conca i en menor mesura el Melton ratio. Totes són variables que es consideren sovint en la literatura de referència. A banda d'aquestes, també es va voler considerar l'orientació mitjana ja que, tot i no presentar gaire rellevància segons l'anàlisi feta en aquest treball, sí que és present a la literatura i té un significat físic. De totes maneres, se li va atorgar un pes relatiu menor que a la resta de les variables.

A partir d'una anàlisi més acurada de les variables separant els dos subdominis d'estudi, s'ha comprovat que la variable cota és una variable regional. Per aquest motiu s'ha pres en el seu lloc la cota relativa a un punt de referència, en aquest cas, la cota a partir de la qual hi ha corrents d'arrossegalls.

A continuació s'han dissenyat les funcions de pertinença de les variables estàtiques a partir de la distribució de les conques reactives en la mostra així com de consideracions preses en la bibliografia de referència. Les funcions de pertinença s'han ajustat de manera que a les conques conegudes com a reactives se'ls assignés una susceptibilitat alta.

L'habilitat del classificador per combinar la susceptibilitat i la severitat de l'episodi de pluja era un dels aspectes claus de la metodologia. Després de provar diferents maneres de combinar els graus de pertinença s'ha optat per la construcció d'unes regles que tenen l'avantatge de conservar el caràcter difús del sistema i permetent la interacció de les variables intermèdies (susceptibilitat i magnitud de l'episodi), combinant-les de manera satisfactòria.

La part final de la tesina ha consistit en provar el funcionament del classificador en el període de maig a octubre de 2010. En aquest període el classificador dóna alertes d'amenaça moderada o alta a la majoria de les conques, però gran part d'aquestes estan desencadenades per dos episodis de pluja concrets.

En cinc episodis concrets d'aquest període s'ha fet una anàlisi més acurada, entrant en el detall de quatre conques en particular. A la conca del Rebaixader s'havien registrat esdeveniments en tres dels episodis. En dos d'ells, el classificador no dóna una alerta fins hores més tard del succés. En ambdós casos, però, es va tractar d'un flux hiperconcentrat al principi de l'episodi de pluja. En el tercer cas, el classificador dóna una alerta en l'instant en què efectivament es va produir el corrent d'arrossegalls.

8.2 Limitacions i potencial de la metodologia

La metodologia presentada en aquesta tesina és un pas més en el disseny d'un sistema d'alertes, però perquè aquest sigui fiable i útil encara caldria perfeccionar diversos aspectes. Algunes de les limitacions s'arrossegueuen dels elements de partida del sistema.

Sobre la definició de les corbes intensitat-durada-pluja antecedent cal mencionar:

- Les corbes utilitzades són pràcticament insensibles a la pluja antecedent. Com que aquestes corbes es van obtenir en una zona concreta (Alt Llobregat), aquest fet s'explica si el terreny és molt granulós, ja que en drenar ràpid la pluja antecedent és menys influent.
- Les corbes utilitzades van estar construïdes a partir d'un model físic en el que es van utilitzar com a paràmetres d'entrada tot un rang de valors de propietats del sòl representatius d'una zona de l'Alt Llobregat. Tot i que aquesta zona engloba un subconjunt de les conques d'estudi, en aquesta tesina s'han extrapolat les corbes a tot el domini, quan en realitat s'hauria d'estudiar la variabilitat dels paràmetres d'entrada del model en tota l'àrea d'estudi i adaptar el model en conseqüència.

- Les corbes utilitzades porten a jutjar com a més severos els episodis de pluja de llarga durada que els de curta durada i alta intensitat, de manera que la intensitat ha de ser molt alta per tal que el sistema doni una alerta. Aquest segon tipus de comportament és característic de corrents d'arrossegalls ja que en sòls detrítics amb alta permeabilitat, l'única manera que la pressió de porus sigui alta és que l'aigua vingui de forma sobtada. El primer tipus de comportament es correspon a inestabilitat en sòls poc permeables (argiles) i tendeixen a causar altres tipus de fenòmens com colades de fang. Després de veure els resultats de l'aplicació del classificador, s'ha conclòs que el nombre de falses alarmes (sobretot d'amenaça moderada) eren massa elevats mentre que en algun cas l'alerta s'ha esdevingut massa tard. Això confirma la sospita que l'ús d'aquestes corbes potser no era del tot adequat.

Aquestes observacions porten a concloure que el grau de representativitat de les corbes intensitat-durada-pluja antecendent és fonamental per aconseguir un sistema d'alertes eficient, i per aquest motiu cal emfatitzar la importància d'elaborar i utilitzar corbes específiques per cada zona.

Una de les principals restriccions a l'hora d'elaborar un model físic és l'estimació de les propietats del sòl com ara la conductivitat hidràulica, ja que no existeixen metodologies que facin factible la mesura d'aquests paràmetres d'una manera sistemàtica i en grans extensions.

A banda de les corbes d'intensitat-durada-pluja antecendent, per una correcta assignació del nivell de severitat de l'episodi, cal que les dades de pluja siguin el més exactes possibles. En aquest sentit, els camps de pluja radar tenen l'avantatge de que proporcionen una bona caracterització de la distribució espacial del camp de pluja (a diferència dels pluviògrafs), però sovint estan afectats per errors de mesura (Zawazki, 1984, Joss i Waldvogel, 1990), que fa que a vegades les seves estimacions puguin estar-ne afectades.

Pel que fa a la definició i càlcul de les variables geomorfològiques són destacables els següents punts:

- Com a unitat de referència s'ha considerat la conca de drenatge, que per definició és l'àrea que drena en un punt. No obstant, l'àrea que contribueix al desencadenament d'un corrent d'arrossegalls estrictament parlant no és la conca sencera sinó que se li ha de restar la zona de deposició. Caldria veure si realment aquest matís és negligible o si al contrari, el valor de les variables s'altera significativament.
- En aquest estudi s'han considerat conjuntament conques de primer i segon ordre encara que poden tenir comportaments diferenciats. Les conques de segon ordre inclouen conques de primer ordre i d'altres de segon ordre. Per aquest motiu torna a ser pertinent la reflexió del punt anterior: les conques de segon ordre poden incloure zones amb característiques en el relleu encara més diverses, de manera que el fet de considerar els valors mitjans de la conca pot no ser representatiu. Per aquest motiu seria interessant considerar si cal tractar per separat les conques de primer i segon ordre.

En la implementació dels conceptes de lògica difusa, s'ha topat amb algunes dificultats:

- La definició de les corbes de pertinença és una tasca complexa. En tenir molts graus de llibertat, l'ajust manual esdevé una tasca difícil i no deixa d'estar lligat a la subjectivitat. La subjectivitat es pot veure alhora com un avantatge o un inconvenient, ja que per una banda permet reflectir el coneixement del modelador, i per l'altra pot fer que els resultats variïn molt d'un modelador a un altre.
- La quantitat de dades per fer una validació és extremadament limitada. Existeixen inventaris de corrents d'arrossegalls, però en molts pocs casos se'n coneix l'hora exacta. Per aquest motiu, l'ajust de les funcions de pertinença s'ha fet de manera aproximada i s'han utilitzat els pocs casos dels que es tenia informació per fer una comprovació del funcionament del sistema. Així doncs, la calibració i validació del sistema queden com una assignatura pendent per quan es tingui una base de dades suficient. En aquest punt, un tema que caldria resoldre és el de limitar el nombre de falses alarmes. Per aquest motiu, un registre sistemàtic de tots els corrents d'arrossegalls de la manera més exacta possible (lloc i hora) contribuiria enormement a l'ajust del sistema.

Per altra banda, la metodologia té també tot un seguit d'avantatges que li confereixen un potencial gens menyspreable:

- La lògica difusa és una eina que permet combinar satisfactòriament la susceptibilitat i la magnitud de l'episodi de pluja, permetent que interactuin entre si seguint les premisses del modelador.
- La metodologia plantejada es compon de peces en certa manera independents, de manera que es poden adaptar a la informació de què es disposi. Per exemple, en aquesta tesina s'ha avaluat la susceptibilitat a partir de quatre variables geomorfològiques, però es pot donar el cas que arrel d'un estudi més en profunditat, es considerin més representatives unes variables diferents. En aquesta situació, caldria substituir les funcions de pertinença i els pesos per aquestes variables, però no caldria modificar la resta del procediment. De la mateixa manera, les corbes ID per estimar la magnitud de l'episodi es poden adaptar a cada regió. Segons el cas es pot considerar també utilitzar corbes ID empíriques enlloc de corbes basades en un model físic (Guzzetti et al., 2007).
- Un dels requisits essencials que havia de complir el sistema era que el temps i cost d'execució fossin baixos, per tal de poder-ho aplicar en àrees extenses i en temps real. Això posava una limitació a la quantitat de dades a tractar. En la metodologia plantejada, les variables es redueixen a cinc valors (quatre variables estàtiques i una dinàmica), de les quals només la dinàmica (acumulació de pluja en mitja hora) varia a cada pas de temps. A més, el tipus d'operacions que es realitzen a través del classificador no impliquen un cost computacional elevat. L'objectiu queda doncs assolit, de manera que es pot plantejar en un futur un desenvolupament avançat del sistema per funcionar a nivell operacional.

- El fet d'integrar dades de radar en un sistema d'alerta de corrents d'arrossegalls és el tret més innovador d'aquesta tesina. Tot i que el classificador s'ha aplicat amb dades històriques, s'han simulat condicions de funcionament en temps real (amb observacions de pluja). És important també mencionar, que a priori no presentaria cap inconvenient si en el seu lloc s'utilitzessin previsions de pluja. Tal com es comenta en la secció 8.4, aquest seria el següent pas per fer efectiu el seu ús en previsió d'amenaques.

8.3 Extensió a altres conques o regions

La metodologia desenvolupada en aquesta tesina per la previsió de corrents d'arrossegalls s'ha aplicat a dos subdominis dels Pirineus orientals. La idea de partida era que es pogués aplicar a nivell operacional i per aquest motiu és necessari plantejar la possibilitat d'extensió de la metodologia a altres conques. Per discutir-ho cal recapitular i veure quins punts de la metodologia són específics per la zona d'estudi i quins són directament generalitzables a qualsevol regió.

Al llarg del desenvolupament de la metodologia i de la discussió ja s'han fet diverses reflexions sobre la necessitat d'adaptar les variables a la zona d'estudi. Els aspectes en els que s'hi ha donat més èmfasi són algunes variables estàtiques (cota màxima) i les corbes ID.

També s'ha comentat en la secció anterior, que un dels avantatges de la metodologia és que en certa manera és modular, és a dir, algunes parts es poden adaptar en funció de la informació de la què es disposi. Si es vol estendre la metodologia a altres conques o regions, com és obvi, les tasques de delimitar les conques i el càlcul de les variables seran inevitables. Altres parts de la metodologia es poden adaptar d'una manera o d'una altra en funció de la informació i dels recursos de què es disposi.

En el cas de les variables estàtiques, és recomanable reconsiderar en tots els casos les variables més adequades per integrar en el sistema. Cal prestar especial atenció a les variables regionals com són la cota màxima i l'orientació del nou domini. A més, en aquesta tesina s'han fet servir exclusivament variables geomorfològiques, però se'n podrien incloure d'altres, com per exemple relacionades amb les característiques i usos del sòl, o altres característiques geològiques. D'aquesta manera, segons el cas caldrà:

- i. Recalcular els pesos de les variables estàtiques.
- ii. Redissenyar les funcions de pertinença. El redisseny pot consistir en una adaptació de la forma als valors locals de les variables o en una modificació completa si s'escau.

Pel que fa les corbes ID, es poden indicar tres alternatives:

- i. Utilitzar les mateixes corbes que s'han utilitzat en aquesta tesina

- ii. Recalculer el model físic donant als paràmetres d'entrada un rang de valors adequats a la nova regió
- iii. Fer servir corbes empíriques. En aquest cas, la variable per avaluar la magnitud de l'episodi de pluja no serà el % d'àrea inestable, sinó que s'haurà d'adaptar en funció del tipus de corba.

Amb tot, l'eficàcia del sistema sempre dependrà de la mesura en que s'hagi pogut adaptar a les característiques locals. Com més específics siguin tots els elements, millor funcionarà la previsió, però més costosa serà la seva implementació.

8.4 Línies a futur

Per començar, per tal de millorar el sistema actual es perfilen diverses línies de treball. Com s'ha argumentat, la qualitat de les variables d'entrada és determinant per obtenir uns resultats fiables. Per tant, tots els esforços encaminats a millorar les corbes ID o a detectar quines variables poden predir millor la susceptibilitat servrien per millorar l'efectivitat del classificador. A més, és destacable la necessitat de poder estimar el temps de saturació per tal de poder tenir en compte l'efecte de la pluja antecedent d'una manera més realista.

Una segona qüestió respecte les variables d'entrada no tenen per què limitar-se a paràmetres geomorfològics, sinó que seria altament interessant explorar altres aspectes com característiques i usos del sòl i la vegetació.

Per últim, per tal que el sistema d'alerta pugui funcionar com a tal, el pas que mancava és integrar la previsió de pluja enlloc de dades històriques. Això permetria anticipar els esdeveniments i activar les mesures de protecció necessàries.

REFERÈNCIES

Ayalew, L., H. Yamagishi, i N. Ugawa, 2004: Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides*, **1**, 73-81.

Bárdossy, A., i L. Duckstein, 1995: *Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems*. CRC Press, 0-8493-7833-8, 232 pp.

Bateman, A., M. Papa, M. Hürlimann, F. Bregoli, G. Chevalier, F. Ciervo, i V. Medina, 2010: Simulation methodology to build the rule-based probabilistic forecasting system. *SP4, IMPRINTS*.

Battle, M., 2011: Llindars de pluja desencadenants de corrents d'arrossegalls: aplicació al barranc del rebaixader. *Tesina ETSECCPB*, UPC, 81 pp.

Berenguer, M., D. Sempere-Torres, i G. G. S. Pegram, 2011: SBMcast – An ensemble nowcasting technique to assess the uncertainty in rainfall forecasts by Lagrangian extrapolation. *Journal of Hydrology*, **404**, 226-240.

Berenguer, M., D. Sempere-Torres, C. Corral, i R. Sánchez-Diezma, 2006: A Fuzzy Logic Technique for Identifying Nonprecipitating Echoes in Radar Scans. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **23**, 1157-1180.

Bregoli, F., A. Bateman, V. Medina, F. Ciervo, M. Hürlimann, i G. Chevalier, 2011: Development of preliminary assessment tools to evaluate debris flow hazard. *5th Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation, Padua*, 835-844.

Carrara, A., G. Crosta, i P. Frattini, 2008: Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, **94**, 353-378.

Carrara, A., F. Guzzetti, M. Cardinali, i P. Reichenbach, 1999: Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards*, **20**, 117-135.

Chevalier, G., [-]: (in prep)-Assessing debris-flow hazard focusing on statistical morpho-fluvial susceptibility models and magnitude-frequency relationships. Application to the Central-Eastern Pyrenees. *Tesis de doctorat, ETSECCPB*, UPC.

Chi, K., N. Park, i C. Chung, 2002: Fuzzy logic integration for landslide hazard mapping using spatial data from Boeun, Korea. *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, ISPRS.

Cho, Y.-H., G. W. Lee, K.-E. Kim, i I. Zawadzki, 2006: Identification and Removal of Ground Echoes and Anomalous Propagation Using the Characteristics of Radar Echoes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **23**, 1206-1222.

- Corominas, J., i J. Moya, 1999: Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, **30**, 79-93.
- Corominas, J., Moya, J., Hürlimann, M., 2002: Landslide rainfall triggers in the spanish eastern Pyrenees. *4th EGS Plinius Conference* Mallorca, Universitat de les Illes Balears
- Dai, F. C., C. F. Lee, i Y. Y. Ngai, 2002: Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, **64**, 65-87.
- Delrieu, G., J. D. Creutin, i H. Andrieu, 1995: Simulation of Radar Mountain Returns Using a Digitized Terrain Model. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **12**, 1038-1049.
- Dubois, D., i H. Prade, 1998: An introduction to fuzzy systems. *Clinica Chimica Acta*, **270**, 3-29.
- Franco, M., R. Sánchez-Diezma, i D. Sempere-Torres, 2008: Improving radar precipitation estimates by applying a VPR correction method based on separating precipitation types. *Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD)*, Helsinki, Finland, CD.
- González de Vallejo, L., M. Ferrer, L. Ortuño, i C. Oteo, 2002: *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall, 8420531049, 715 pp.
- Guzzetti, F., A. Carrara, M. Cardinali, i P. Reichenbach, 1999: Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, **31**, 181-216.
- Guzzetti, F., S. Peruccacci, M. Rossi, i C. Stark, 2008: The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, **5**, 3-17.
- Hürlimann, M., R. Copons, i J. Altimir, 2006: Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach. *Geomorphology*, **78**, 359-372.
- Iverson, R. M., M. E. Reid, i R. G. LaHusen, 1997: DEBRIS-FLOW MOBILIZATION FROM LANDSLIDES1. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **25**, 85-138.
- Jakob, M. a. J., P., 2001: Design flood estimates in mountain streams – the need for a geomorphic approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 425-439.
- Joss, J., i A. Waldvogel, 1990: Precipitation measurements and hydrology. *Radar in meteorology: Battan memorial and 40th anniversary of the radar meteorology*, D. Atlas, Ed., Amer. Meteor. Soc, 577-606.
- Lee, S., i K. Min, 2001: Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, **40**, 1095-1113.
- Lee, S., J.-H. Ryu, J.-S. Won, i H.-J. Park, 2004: Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, **71**, 289-302.

Medina, V., i M. Zappa, 2011: Rule-based system for FF and DF forecasting. *SP4, IMPRINTS*, 21-30.

Mendel, J. M., 1995: Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, **83**, 345-377.

Muthu, K., M. Petrou, C. Tarantino, i P. Blonda, 2008: Landslide Possibility Mapping Using Fuzzy Approaches. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, **46**, 1253-1265.

Papa, M., F. Ciervio, V. Medina, G. Chevalier, M. Hürlimann, i F. Bregoli, 2010: Input variables for the rule-based system. *SP4, IMPRINTS*.

Portilla, M., G. Chevalier, i M. Hürlimann, 2010: Description and analysis of the debris flows occurred during 2008 in the Eastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Science*, **10**, 1635-1645.

Sánchez-Diezma, R., 2001: Optimización de la medida de lluvia por radar meteorológico para su aplicación hidrológica. Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 313 pp.

Sempere-Torres, D., R. Sánchez-Diezma, I. Zawadzki, i J. D. Creutin, 1999: DSD identification following a preclassification of rainfall type from radar analysis. *29th International Conference on Radar Meteorology*, Montreal, Canada, Amer. Meteor. Soc., 632-635.

Takahashi, T., 2007: *Debris Flow: mechanics, prediction and countermeasures*. London: Taylor and Francis Group, 9780415435529.

Wilford, D. J., M. E. Sakals, J. L. Innes, R. C. Sidle, i W. A. Bergerud, 2004: Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, **1**, 61-66.

Zawadzki, I., 1984: Factors affecting the precision of radar measurement of rain. *22nd International Conference on Radar Meteorology*, Zurich, Switzerland, Amer. Meteor. Soc. 251-256.